



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES

**EVALUACIÓN DE LA PERSISTENCIA DE METALES PESADOS EN ACUÍFEROS
DE MÉXICO MEDIANTE UN ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL Y
MODELACIÓN MONTE CARLO PARA LA GENERACIÓN DE
UN ÍNDICE AMBIENTAL**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES

P R E S E N T A:

BIÓL. VANELY LIZETTE ESPINOZA SILVA

DIRECTOR: DR. ZAKARYAA ZARHRI

CODIRECTOR: DRA. MARIANA ROMERO AGUILAR



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

CUERNAVACA, MORELOS.

ENERO, 2026

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi profundo agradecimiento al Dr. Zakaryaa Zarhri, por brindarme la oportunidad de adentrarme en un enfoque distinto a mi línea de formación y guiar este trabajo desde la física y la modelación. Su acompañamiento académico amplió mi perspectiva científica y enriqueció de manera significativa este proyecto.

A la Dra. Mariana Romero Aguilar, por abrirme las puertas, por su paciencia a lo largo del proceso y por el acompañamiento humano que en distintos momentos compartimos. Su apoyo fue fundamental tanto en lo académico como en lo personal.

A los integrantes del comité revisor:

al Dr. Hugo Saldarriaga, por sus valiosos aportes y observaciones;

al Dr. Manuel Rivas, por su entusiasmo y contribuciones al desarrollo de este trabajo;

y al Dr. Rubén Argüello, por su minuciosa revisión del documento final.

A mis amigas y compañeras de maestría, Paty Herrera y Yani Lizárraga, por coincidir desde el inicio y compartir este camino desde la autenticidad de lo que cada una es. Su presencia hizo de esta etapa una experiencia más humana y significativa.

A mi familia, por ser un sostén constante, por estar presentes en cada etapa y por su apoyo incondicional durante todo este proceso.

A mi *alma mater*, la Universidad Autónoma del Estado de Morelos por la formación académica y humana que ha marcado profundamente mi trayectoria.

A la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, por abrirme las puertas a una formación multidisciplinaria, y a la coordinación del posgrado por su disposición y agilidad en los procesos administrativos.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por el apoyo otorgado que hizo posible la realización de estos estudios.

A mí,

Cada oportunidad abre un nuevo nivel,
y en cada inicio existe una posibilidad infinita
de aprender, transformarse y crecer.

Mi energía abre caminos
en lugares que mis ojos físicos aún no pueden ver.

Con amor, gratitud y consciencia,
para la mujer en constante expansión de sus propios límites,
por quien estoy destinada a ser
y por todo lo que aún está por comenzar en plenitud.

Vanely L.E.S. ✧

INDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	ANTECEDENTES.....	2
2.1	Internacionales.....	2
2.2	Nacionales.....	3
3	MARCO TEÓRICO.....	5
3.1	Disponibilidad del agua.....	5
3.1.1	Mundial.....	5
3.1.2	Situación actual del agua en México.....	9
3.1.2.1	Usos del agua.....	12
3.2	Cuerpos de agua.....	14
3.2.1	Tipos de acuíferos.....	14
3.3	Contaminación de cuerpos de agua.....	16
3.3.1	Clasificación de contaminantes.....	16
3.4	Fuentes de contaminación.....	17
3.5	Impacto y riesgo ambiental.....	18
3.6	Riesgos asociados a la salud humana.....	20
3.7	Marco legal.....	21
3.7.1	Principales disposiciones jurídicas en México.....	21
3.7.2	Normas Oficiales Mexicanas.....	23
4	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.....	24
5	JUSTIFICACIÓN.....	25
6	OBJETIVOS.....	25
6.1	General.....	25
6.2	Específicos.....	25
7	ESTRATEGIA EXPERIMENTAL.....	26
8	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	26
9	MATERIAL.....	27
9.1.1	Software.....	27
9.2	Captura de Información.....	28
9.3	Estructura de la Base de Datos.....	28
10	METODOLOGÍA.....	30

10.1	Etapa 1: Criterios de filtrado y limpieza de los datos.....	30
10.2	Etapa 2: Análisis de coincidencias y comportamientos constantes	31
10.3	Etapa 3: Identificación de sitios y metales prioritarios.....	31
10.4	Etapa 4: Criterio de acotación	32
10.5	Etapa 5: Índice Ambiental de As (IAA).....	32
10.5.1	Indicadores que componen el IAA	33
10.5.2	Fórmula.....	33
10.5.3	Clasificación por niveles de severidad	33
10.6	Etapa 6: Representación espacial del IAA y factores de presión	33
10.7	Etapa 7: Selección de pozo representativo por estado.....	34
10.8	Etapa 8: aplicación de simulación Monte Carlo.....	34
10.8.1	Simulación mediante construcción manual de algoritmo adaptativo	35
10.8.2	Simulación asistida por la función automatizada del módulo integrado	37
11	RESULTADOS.....	39
11.1	Descripción general de los datos subterráneos.....	39
11.2	Análisis por coincidencias temporales	40
11.3	Evaluación de Sitios Críticos.....	41
11.4	Coincidencia de LMP excedentes a nivel nacional	43
11.5	Acuífero Los Planes 323	44
11.6	Identificación de pozos con As persistente.....	49
11.7	Identificación de acuíferos sobreexplotados con presencia de As persistente.....	54
11.8	Comportamiento estatal de la concentración anual promedio de arsénico.....	57
11.8.1	Comparación del comportamiento anual de la concentración promedio de As en los pozos del corredor centro-norte	60
11.9	Índice Ambiental de Arsénico.....	61
11.9.1	Sitios Nivel 1 (Crítico) y la situación hidrogeológica de sus acuíferos.....	65
11.10	Distribución espacial del IAA y su relación con factores de presión geológica y antrópica	65
11.10.1	Durango	65
11.10.2	Guanajuato.....	66
11.10.3	Coahuila.....	67
11.10.4	Zacatecas	68
11.11	Pozos representativos para Monte Carlo	69

11.12	Simulación Monte Carlo.....	70
11.12.1	Pozo Dieciséis de Septiembre, Durango.....	70
11.12.2	Comunidad Jaguey de los Serranos, Guanajuato	71
11.12.3	Pozo 369 Albia, Coahuila	73
11.12.4	Estancia La Colorada, Zacatecas	74
11.13	Características de los Acuíferos empleados en simulación Monte Carlo.....	76
11.13.1	Acuífero Valle de Guadiana.....	76
11.13.2	Acuífero La Muralla	80
11.13.3	Acuífero Principal-Región Lagunera	83
11.13.4	Acuífero Guadalupe de las Corrientes.....	87
12	CONCLUSIONES.....	90
13	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	92
14	BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES CONSULTADAS A LA FECHA.....	93

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución mundial del agua.	6
Figura 2. Países con mayor población en el mundo 2020.	6
Figura 3. Recursos de agua dulce internos renovables per cápita (m ³) de los países más poblados.	8
Figura 4. Recursos de agua dulce internos renovables per cápita (m ³) en México.	10
Figura 5. Regiones hidrológico-administrativas y agua renovable per cápita 2021.	12
Figura 6. Porcentaje de volumen concesionado por uso consuntivo y no consuntivo.	13
Figura 7. Porcentaje de volumen concesionado de uso consuntivo en México, 2022.	14
Figura 8. Formaciones geológicas de los acuíferos.	15
Figura 9. Diagrama de la metodología.	26
Figura 10. Ventana de ajuste de distribución en Origin.	35
Figura 11. Simulación con la función de números aleatorios gaussianos estándar de Origin.	36
Figura 12. Cálculo de la media para el primer año simulado.	37
Figura 13. Ventana de Monte Carlo Simulation en Origin.	38
Figura 14. Fluctuaciones del número de muestreos subterráneos por año CONAGUA.	39
Figura 15. Distribución geográfica de los sitios críticos identificados.	41
Figura 16. Ubicación geográfica de los pozos con los valores máximos de metales a nivel nacional.	43
Figura 17. Distribución estatal de sitios con presencia persistente de As (≥ 6 años).	50
Figura 18. Comparación entre sitios con As persistente y su localización en acuíferos sobreexplotados por estado (2012–2022).	54
Figura 19. Distribución nacional de fuentes de presión sobre pozos con As persistente.	56
Figura 20. Comportamiento anual de la concentración promedio de As en pozos de Durango.	57
Figura 21. Comportamiento anual de la concentración promedio de As en pozos de Zacatecas.	58
Figura 22. Comportamiento anual de la concentración promedio de As en pozos de Coahuila.	59
Figura 23. Comportamiento anual de la concentración promedio de As en pozos de Guanajuato.	60
Figura 24. Comportamiento anual de la concentración promedio de As en pozos subterráneos por estado (2012–2022).	61
Figura 25. Distribución espacial del IAA y su relación con factores de presión geológica y antrópica en el estado de Durango.	66
Figura 26. Distribución espacial del IAA y su relación con factores de presión geológica y antrópica en el estado de Guanajuato.	67
Figura 27. Distribución espacial del IAA y su relación con factores de presión geológica y antrópica en el estado de Coahuila.	68
Figura 28. Distribución espacial del IAA y su relación con factores de presión geológica y antrópica en el estado de Zacatecas.	69

Figura 29. Concentración de As estimada mediante simulación Monte Carlo y datos históricos del pozo Dieciséis de septiembre, Durango.	70
Figura 30. Concentración de As estimada mediante simulación Monte Carlo y datos históricos del pozo Comunidad Jaguey de los Serranos, Guanajuato.	72
Figura 31. Concentración de As estimada mediante simulación Monte Carlo y datos históricos del pozo 369 Albia, Coahuila.	73
Figura 32. Concentración de As estimada mediante simulación Monte Carlo y datos históricos del pozo Estancia La Colorada, Zacatecas.	75

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Agua renovable <i>per cápita</i> por región hidrológico-administrativa 2021.....	11
Tabla 2. Volumen concesionado por categoría de los usos del agua del REPDA 2022.....	13
Tabla 3. Tipos de acuíferos en México.	16
Tabla 4. Clasificación de las características de la calidad del agua.....	17
Tabla 5. Principales disposiciones jurídicas en materia de agua.	22
Tabla 6. Principales Normas Oficiales Mexicanas en materia de agua.	23
Tabla 7. Estructura de la hoja de sitios.	29
Tabla 8. Estructura de la hoja de resultados.	29
Tabla 9. Estructura de la hoja de simbología.....	29
Tabla 10. Especificaciones Sanitarias de Metales y Metaloides de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021.	30
Tabla 11. Clasificación de niveles de severidad del IAA en pozos.	33
Tabla 12. Valores máximos de metales a nivel nacional.	42
Tabla 13. Concentraciones excedentes de los LMP de acuerdo con las NOM-127-SSA1-2021.	47
Tabla 14. Grupos Hidrogeoquímicos del acuífero Los Planes.	48
Tabla 15. Pozos con presencia de As persistente.....	51
Tabla 16. Acuíferos sobreexplotados con As persistente en pozos por estado (2012–2022).55	
Tabla 17. Distribución estatal de sitios persistentes por Nivel de clasificación del IAA.	62
Tabla 18. Listado de los pozos contaminados y su clasificación según el IAA.	62
Tabla 19. Sitios Nivel 1 - Crítico y la situación hidrogeológica de sus acuíferos.	65
Tabla 20. Pozos seleccionados para simulación Monte Carlo: estadísticas y clasificación. 70	
Tabla 21. Comparación de concentraciones de As: valores históricos y proyecciones Monte Carlo (2023–2028).....	71
Tabla 22. Comparación de concentraciones de As: valores históricos y proyecciones Monte Carlo (2023–2028).....	72
Tabla 23. Comparación de concentraciones de As: valores históricos y proyecciones Monte Carlo (2023–2028).....	74
Tabla 24. Comparación de concentraciones de As: valores históricos y proyecciones Monte Carlo (2023–2028).....	75
Tabla 25. Cronograma de actividades.....	92

LISTA DE ACRÓNIMOS

ANOVA: análisis de la varianza

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua

DRASTIC: Depth, Recharge, Aquifer, Soil, Topography, Impact zone y Conductivity.

GIS: Sistemas de Información Geográfica

IAA: Índice Ambiental de Arsénico

ICA: Índice de Calidad del Agua

ICV: Índice de Calidad de Vida

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

JCR: Journal Citation Reports

LAN: Ley de Aguas Nacionales

LMP: Limite Máximos Permisible

NMX: Normas Mexicanas

NOM: Norma Oficial Mexicana

OMS: Organización Mundial de la Salud

REPDA: Registro Público de Derechos de Agua

SCFI: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SINA: Sistema Nacional de Información del Agua

SSA: Secretaría de Salud

1 INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para los ecosistemas y el bienestar humano (Connor y Miletto, 2023). Sin embargo, su calidad se ve afectada por diversas actividades antrópicas y fenómenos naturales que provocan la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Jiménez y Galizia, 2012). Esta contaminación representa un riesgo importante a nivel mundial para la salud pública y el medio ambiente, lo que hace indispensable comprender y abordar sus causas y consecuencias (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

En México la contaminación del recurso hídrico es debido a una gran variedad de contaminantes incluyendo principalmente plaguicidas y metales pesados (Azpilcueta et al., 2017, González et al., 2018, Gutiérrez et al., 2022, Mora et al., 2012). Esto representa implicaciones socioeconómicas, considerando costos de salud pública y pérdidas económicas asociadas con la degradación ambiental.

En este contexto, el objetivo principal del presente estudio es analizar la contaminación de cuerpos de agua y evaluar su riesgo ambiental en México, a través de la identificación de los puntos críticos de contaminación, así como determinar los factores que influyen en la dispersión de contaminantes y prevenir la evolución de la contaminación a través de etapas de análisis y evaluación, que incluyen la recopilación y validación de datos, la aplicación de herramientas de GIS para mapear la distribución espacial de contaminantes, el análisis estadístico de las tendencias de contaminación y la modelización probabilística de la dispersión de contaminantes utilizando el método Monte Carlo.

Al abordar estos aspectos, se espera obtener información que pueda respaldar la toma de decisiones en materia de gestión ambiental sobre los recursos hídricos en México. Este proyecto no solo proporcionará una visión detallada del estado actual de la contaminación del agua en el país, sino que también sentará las bases para futuras investigaciones y acciones dirigidas a mitigar los impactos negativos de este problema.

2 ANTECEDENTES

2.1 Internacionales

Los estudios que se presentan a continuación brindan perspectivas complementarias sobre la gestión y evaluación de la calidad de agua en acuíferos subterráneos. Cada uno de ellos tiene enfoques distintos pero interrelacionados.

El primero de ellos realizado por Grondona et al., (2022), se enfoca en el riesgo de contaminación del agua subterránea en la cuenca del río Quequén Grande, Buenos Aires, Argentina, considerando el uso de plaguicidas, las características del suelo y la naturaleza del acuífero. Utilizando ARCGIS, combinaron dos indicadores clave: el índice de vulnerabilidad del acuífero (DRASTIC) y la carga potencial de contaminantes (AFT). Identificaron cinco plaguicidas con baja probabilidad de lixiviar, y generaron dos mapas de riesgo que resaltan zonas de menor riesgo debido a un nivel freático más profundo y mayor presencia de materia orgánica, los cuales son útiles para la gestión del agua subterránea en casos de baja contaminación, destacando la importancia de utilizar herramientas de evaluación de riesgos para la gestión efectiva del agua subterránea en áreas agrícolas.

Los mismos autores Grondona et al., (2022), analizaron la vulnerabilidad social relacionada con el riesgo de consumir agua proveniente de acuíferos en peligro de contaminación por plaguicidas. Para ello, se creó un Índice de Calidad de Vida (ICV) basado en tres indicadores cuantitativos que abarcaron aspectos de salud, educación y medios de subsistencia. El análisis reveló que existe una predominancia de "moderada vulnerabilidad social" en el área estudiada, según el mapa obtenido. Este mapa puede ser una herramienta útil para la gestión del agua subterránea, ya que permite identificar las áreas donde la población está más expuesta a sufrir impactos negativos en caso de contaminación del acuífero por plaguicidas, facilitando así la toma de decisiones para la protección de la salud pública y la calidad del agua.

En conjunto, estos estudios ofrecen una visión integral que combina aspectos técnicos y sociales para abordar los desafíos de la contaminación del agua subterránea, destacando la importancia de considerar tanto los riesgos técnicos como las implicaciones sociales en la gestión del recurso hídrico. Por otro lado, Diaz et al., (2018) evaluaron el impacto de las actividades antrópicas en el municipio de Villapinzón, Colombia, en las características

fisicoquímicas y microbiológicas del río Bogotá. Se analizaron 4 variables microbiológicas y 26 variables fisicoquímicas, incluyendo Cromo, Plomo y Mercurio, en nueve estaciones de muestreo. Se demostró que, en todas las estaciones, los valores microbiológicos superaban los estándares de salud establecidos, lo que sugiere que este fenómeno podría ser la causa principal de la alta incidencia de enfermedades infecciosas y parasitarias del sistema digestivo observada en niños mayores de 5 años en la zona de estudio. Además, se detectó que la concentración de cromo total excedía el límite máximo considerado seguro para la salud humana, lo que indica un deterioro continuo atribuido a las actividades humanas.

Por último, Yuan y colaboradores, (2019) seleccionaron una urbe en el sureste de China, afectada por la contaminación de Cadmio (Cd), como área de estudio para calcular las emisiones de Cd generadas por las actividades humanas en las aguas superficiales, el suelo y la atmósfera. El estudio resalta que la producción industrial es la principal fuente de emisiones antropogénicas de Cadmio (Cd), siendo responsable del 62,1% del total. Otras fuentes, como la acuicultura, el tratamiento de aguas residuales, la agricultura y la cría de animales, contribuyen con menos del 10% cada una. Siendo la producción de pigmentos la mayor fuente de emisiones industriales de Cd. Además, se señala que los cursos de agua irrigados funcionan como vías de transmisión de la contaminación por Cd desde el suelo hacia el agua. Este estudio proporciona apoyo para que los gobiernos locales adopten estrategias de gestión del ciclo de vida del Cd.

Estudios como el de Díaz et al. (2018) y el de Yuan et al. (2019) abordan problemáticas en común de contaminación ambiental a consecuencia de actividades antrópicas, a pesar de estar en contextos geográficos distintos, resaltan la importancia de comprender y abordar los riesgos asociados con la contaminación del agua para proteger la salud humana y el ambiente.

2.2 Nacionales

El territorio mexicano enfrenta diversos desafíos en términos de contaminación del agua, diversas investigaciones evalúan la calidad del agua en distintas regiones del país, lo que abre pauta a un panorama integral sobre los desafíos que enfrenta cada región en términos de contaminación del agua y sus potenciales impactos en la salud humana y el ambiente.

Para la región norte encontramos a Azpilcueta et al., (2017) evaluaron la calidad química del agua de riego procedente de pozos profundos en campos dedicados a la producción de maíz

forrajero en la Comarca Lagunera, México. Se realizaron cuatro muestreos que midieron la conductividad eléctrica (CE) y dureza, así como concentraciones de los cationes Ca^+ , Mg^+ , Na^+ y K^+ y metales pesados Cd, Pb y As. El agua presenta niveles elevados de salinidad, con valores que varían entre alto y muy alto y que oscilan entre 1732 y 3386 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La sodificación se encuentra en un nivel medio, con un valor de 3.66 meq/L, mientras que la dureza del agua varía de dura a muy dura, con un promedio entre 50.47 y 114.00 °f. También, se detectaron concentraciones elevadas de varios elementos químicos, destacando el Calcio (Ca), el Magnesio (Mg) y el Plomo (Pb). Además, tanto el Cadmio (Cd) como el Arsénico (As) superaron los LMP por la normativa oficial del agua para uso agrícola (SCFI-2001 y NOM-117-SSA1-1994).

Este estudio aborda directamente la calidad del agua utilizada en la agricultura, destacando la presencia de metales pesados y otros contaminantes que impactan la salud y el ambiente.

Respecto a la región sur González et al., (2018) implementaron un método diseñado para evaluar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas para poder obtener datos sobre áreas que podrían estar potencialmente en riesgo. Para el análisis de riesgo se aplicó el método del Grupo COST Action 620. Se generaron mapas de peligrosidad y riesgo utilizando un SIG. Se llevó a cabo la modelización de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea mediante una adaptación del índice DRASTIC. La clase de vulnerabilidad moderada ocupó la mayor extensión. Las zonas de alta peligrosidad y de alto riesgo se encuentran ubicadas principalmente en la zona metropolitana de Mérida. Los hallazgos de esta investigación abren una pauta a la correlación entre las cargas contaminantes subsuperficiales y la vulnerabilidad de contaminación de los acuíferos.

En la región centro-norte del país Gutiérrez et al., (2022) midieron las concentraciones de fluoruro (F^-) de agua subterránea de abastecimiento potable en México en las zonas áridas, donde este contaminante se encuentra en la zona de manera natural. Para ello, utilizaron una base de datos con 1,117 registros (2017-2019). La concentración de F varió en un rango de 0.03 a 27.9 mg/L, con 52, 45 y 36 % de muestras por encima del límite de 1.5 mg/L, establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para los estados de Zacatecas, Chihuahua y Durango. Se encontró correlación entre F y As en los tres estados, siendo Zacatecas el que

presentó la más alta ($r = 0.801$, $p < 0.01$). Estas concentraciones elevadas en agua de pozo representan, sin duda, grandes riesgos a la salud humana.

Por último, Mora et al., (2012) llevaron a cabo un análisis de As total (AsT) y presencia de coliformes totales y fecales en el agua potable del municipio de Tecuala, Nayarit, México. Utilizaron espectrofotometría de fluorescencia atómica para el As y la técnica del número más probable (NMP) para los coliformes. El estudio demostró que, aunque la concentración promedio de AsT en tres zonas del municipio cumple con los límites establecidos por las NOM, supera el máximo establecido por la OMS. La presencia de coliformes sugiere contaminación por aguas residuales de tipo municipal, lo que podría aumentar los niveles de As. Los resultados obtenidos contribuyen a la evaluación de la calidad del agua de los pozos que suministran a la población.

Estos dos últimos estudios identificaron la presencia de As como un problema relevante en la calidad del agua subterránea para consumo humano, proviniendo de posibles fuentes naturales y antrópicas, con características ambientales y demográficas distintas. Estos resultados resaltan la importancia de abordar el tema del As en el agua potable y subterránea como una preocupación de carácter nacional que requiere medidas de mitigación y control adecuadas para proteger la salud pública.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Disponibilidad del agua

3.1.1 Mundial

El agua es un elemento esencial para la existencia de todas las formas de vida en la Tierra. Representa un derecho humano fundamental. El planeta está conformado en su mayoría por agua; de esta, aproximadamente el (97.2 % es salina y solo el 2.5% corresponde a agua dulce. Del total de agua dulce, cerca del 30% se encuentra en acuíferos subterráneos, mientras que alrededor del 68% está almacenada en glaciares y otras capas de nieve. Solo un pequeño porcentaje (Figura 1), aproximadamente el 1.2%, es agua superficial que se encuentra en ríos, lagos y otras formas de agua en la superficie (Connor y Miletto, 2023).

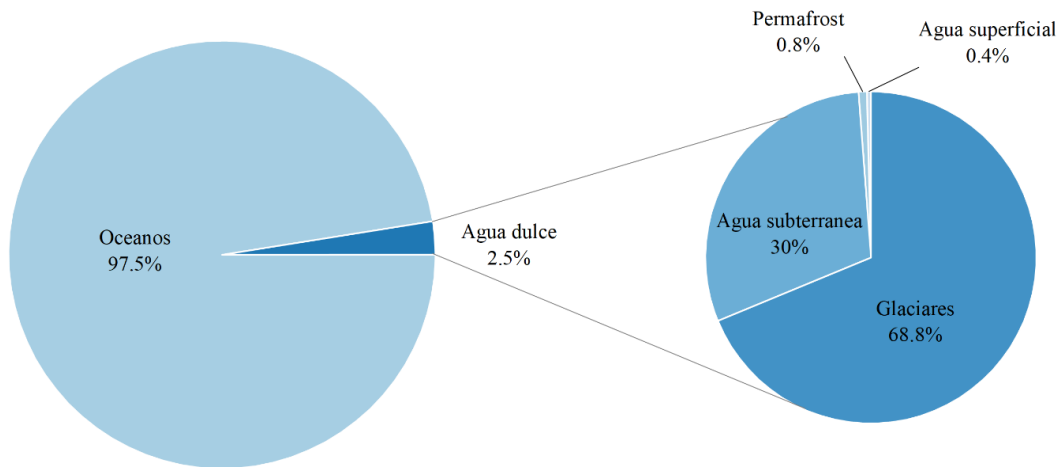


Figura 1. Distribución mundial del agua.

Fuente: datos tomados de Connor y Miletto (2023).

El rápido crecimiento poblacional y la producción agrícola, combinado con el aumento de la industrialización a nivel global, ha generado una mayor demanda de agua dulce en todo el mundo (Márquez et al., 2023). De acuerdo con datos del Banco Mundial, durante el 2020 los países de China e India con 1,300 millones de habitantes se ubicaron dentro de los primeros lugares del top 20 de los países más poblados del mundo. México se sitúa en el lugar número diez de este ranking global, tal como se muestra en la figura 2.

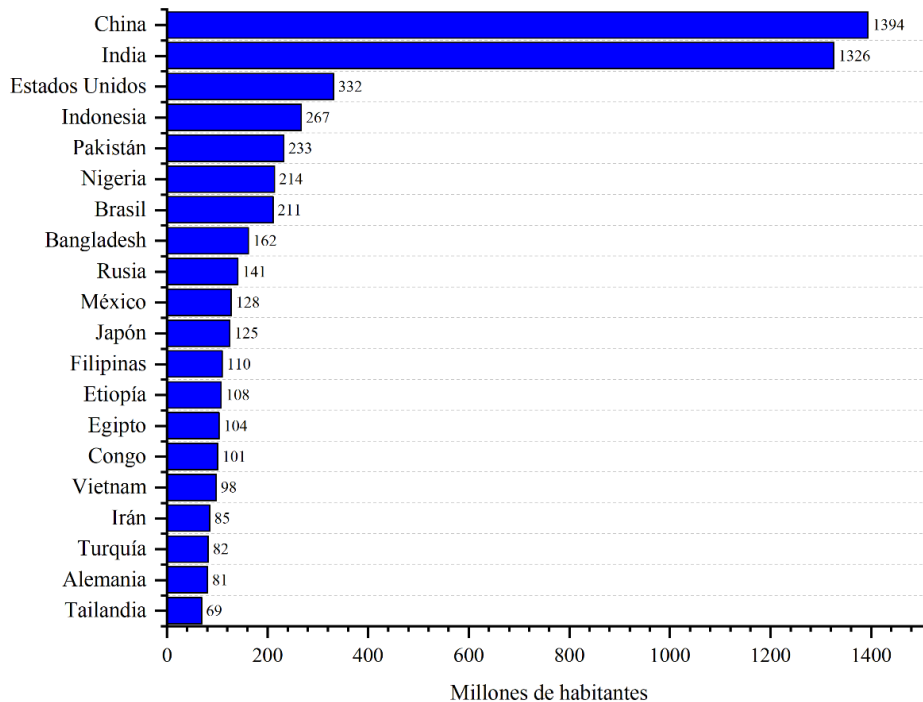


Figura 2. Países con mayor población en el mundo 2020.

Fuente: datos tomados del Banco Mundial (2020).

El agua renovable se calcula a partir del escurrimiento natural medio superficial interno anual, la recarga total anual de los acuíferos y el balance neto de los flujos de entrada y salida de agua a otras regiones (Cooley, et al. 2014).

Este recurso hídrico se puede explotar de manera sustentable a nivel regional; sin embargo, se estima que en 2020 el volumen de agua fue de alrededor de 42,000 millones de m³ del líquido (Banco Mundial, 2020). La problemática surge cuando se supera la capacidad de recuperación de un acuífero en un periodo determinado, aunado a una gestión ineficiente del recurso. cuando estos límites son rebasados, se presenta una condición de escasez, la cual puede clasificarse en dos grandes vertientes: escasez física y escasez social, también conocida como escasez económica.

Escasez física o sequía: Definida por causas naturales, esta forma de escasez se refiere a la falta de suficientes recursos hídricos en una zona específica. Según Esparza (2014), la escasez física ocurre cuando el agua se consume más rápidamente de lo que puede reponerse naturalmente. Factores como el cambio climático, la disminución de las precipitaciones, el aumento de la evapotranspiración y la sobreexplotación de fuentes de agua subterránea y superficial contribuyen a esta situación. Los patrones impredecibles de precipitación, exacerbados por el cambio climático, incrementan el riesgo de eventos extremos como inundaciones y sequías, lo que agrava la escasez física de agua y dificulta su disponibilidad a largo plazo.

Escasez social: es influenciada por factores socioeconómicos y de gestión. Según Cooley et al. (2014), la escasez social se origina en la falta de acceso equitativo y asequible al agua, derivada de problemas como la pobreza, la desigualdad social, la mala gestión de los recursos hídricos, la falta de infraestructura adecuada y la ineficiencia en la distribución. del agua. En muchas regiones, incluso donde el agua es bastante abundante, la población puede enfrentar dificultades significativas para acceder a ella debido a estas barreras sociales y económicas.

La ONU estima que más de la mitad de la población mundial enfrenta algún grado de escasez de agua durante uno o más meses al año.

Los países más poblados del mundo han experimentado una tendencia a la disminución del agua disponible en las últimas décadas. De acuerdo con datos del Banco Mundial se muestra

una amplia variación en los recursos de agua dulce internos renovables entre los diferentes países, mientras Alemania, Japón y Bangladesh mantienen niveles relativamente estables a lo largo del tiempo, otros como Congo, Brasil y Rusia muestran cifras significativamente más altas (Figura 3) (Banco Mundial 2020).

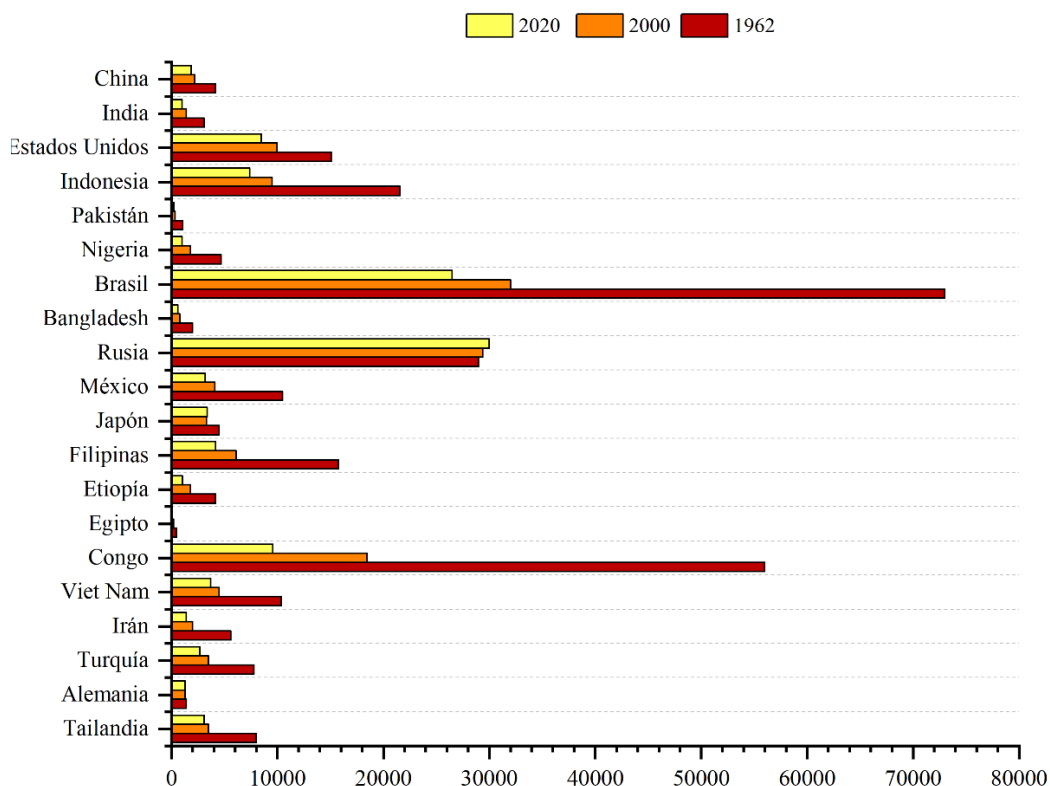


Figura 3. Recursos de agua dulce internos renovables per cápita (m³) de los países más poblados.

Fuente: datos tomados del Banco Mundial (2024).

Existe una amplia variedad de factores que influyen en la disponibilidad del recurso hídrico. Pero es un hecho que, aunque los cuerpos de agua en todo el mundo presentan características muy diversas, todos enfrentan amenazas comunes. El agua resulta ser el eje principal en la adaptación al cambio climático y actúa como un vínculo entre el sistema climático, la sociedad humana y el ambiente, además de ser fundamental para el desarrollo socioeconómico de las poblaciones (López et al., 2017).

Según el Informe de Síntesis sobre Cambio Climático de 2014 del IPCC, se ha observado un calentamiento con récord histórico en el sistema climático. A consecuencia, se estiman cambios alterados en el ciclo del agua, como la disparidad de la precipitación entre regiones secas y humedad.

De acuerdo con la NOAA, (2016), la mayoría de las regiones subtropicales secas experimentarán una disminución de agua renovable superficial y subterránea. Estos cambios conllevarán riesgos para la cantidad y calidad del agua disponible para la sociedad, lo que aumentará la competencia entre los usuarios de este recurso.

Dentro de los efectos del cambio climático no se descartan los riesgos asociados a la seguridad alimentaria con la reubicación de zonas de cultivo; los efectos serán más pronunciados en las áreas con procesos de urbanización acelerados, pero también afectarán al medio rural debido a cambios en la disponibilidad de agua y variaciones de temperatura.

Por otro lado, de acuerdo con Jiménez y Galizia (2012), la disminución de la calidad del agua dulce debido a la contaminación tiene un impacto significativo en su disponibilidad para el consumo, especialmente cuando se sobrepasa la capacidad natural de autodepuración de los ríos. Los vertidos agrícolas y urbanos, así como la contaminación industrial, representan una amenaza global para los recursos hídricos, causando daños y degradación en los ecosistemas. Además, estas actividades tienen consecuencias económicas directas en la pesca y en las industrias de los países tanto desarrollados como en vías de desarrollo que dependen de agua limpia para operar. Como resultado, la seguridad hídrica se ve cada vez más comprometida debido al deterioro de su calidad.

Cuando se extrae más agua de la que se recarga, se desencadena una serie de problemas adicionales, como se detallan a continuación. En primer lugar, en muchas regiones, el agua superficial y subterránea están interconectadas, lo que significa que la reducción del nivel freático tiende a acelerar la recarga del acuífero a expensas de los flujos de agua superficial. En segundo lugar, el hundimiento del suelo, o asentamiento de la superficie, suele ser el resultado de una sobreexplotación prolongada de agua subterránea. Por último, la sobreexplotación puede provocar una degradación significativa en la calidad del agua subterránea (Metcalf y Eddy et al., 2013).

3.1.2 Situación actual del agua en México

De acuerdo con datos del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) el agua renovable asciende a los 461,640 hm³. El 80% de esta agua se localiza a nivel superficial dividida en 757 cuencas, incluyendo 8 de carácter transfronterizo. Estas cuencas se agrupan en 13 regiones hidrológico-administrativas, que contienen 51 ríos principales. Por otro lado, el 20% restante se reparte en 653 acuíferos, de los cuales, 157 se encuentran sobreexplotados,

32 presentan suelos salinos y agua salobre, y otros 18 se ven afectados por intrusión marina (SINA, 2021).

En México, el promedio de agua ha experimentado un descenso significativo a lo largo de las décadas. En 1963, el promedio era de 10,200 m³ per cápita. Para el año 2000, este promedio había disminuido a 4 mil m³. El dato más reciente corresponde al año 2020, que muestra cifras que continúan disminuyendo, llegando a 3.2 mil m³ per cápita (Figura 4) (Banco Mundial, 2020).

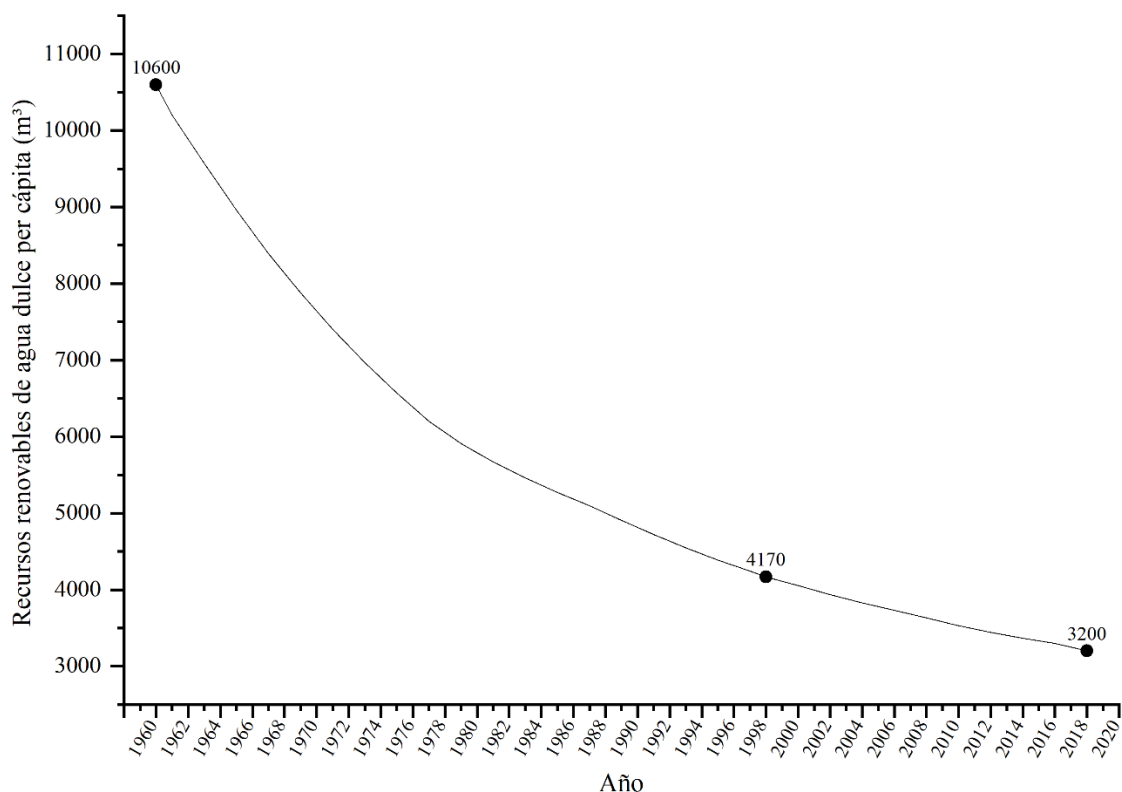


Figura 4. Recursos de agua dulce internos renovables per cápita (m³) en México.

Fuente: datos tomados del Banco Mundial (1960-2018).

De acuerdo con la Tabla 1, de las 13 regiones hidrológico-administrativas que muestran signos de estrés hídrico en la condición de agua renovable per cápita, son las siguientes: RHA I (Península de Baja California) siendo la más seca, VI (Río Bravo), VII (Cuencas Centrales del Norte), VIII (Lerma-Santiago-Pacífico) siendo la más poblada y XIII (Aguas del Valle de México). Se prevé que, siguiendo esta misma tendencia, la región IV (Balsas) experimentará estrés hídrico en un futuro cercano.

Tabla 1. Agua renovable *per cápita* por región hidrológico-administrativa 2021.

Clave RHA	RHA	Año	Agua Renovable	Población	Agua Renovable <i>Per cápita</i> m ³ /hab/año
I	Península de Baja California	2021	4,959.96	4.89	1,013.98
II	Noroeste	2021	8,274.83	3.06	2,704.75
III	Pacífico Norte	2021	26,630.02	4.75	5,606.50
IV	Balsas	2021	23,445.62	12.48	1,879.22
V	Pacífico Sur	2021	31,309.80	5.23	5,983.52
VI	Rio Bravo	2021	13,045.02	13.18	989.48
VII	Cuencas Centrales del Norte	2021	4,667.43	4.82	968.97
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	2021	35,247.02	25.73	1,370.01
IX	Golfo Norte	2021	28,695.05	5.57	5,155.19
X	Golfo Centro	2021	95,022.22	11.03	8,613.31
XI	Frontera Sur	2021	158,020.79	8.18	19,328.46
XII	Península de Yucatán	2021	28,877.87	5.11	5,651.94
XIII	Aguas del Valle de México	2021	3,444.33	24.21	142.27

Fuente: SINA, 2021.

El análisis de la disponibilidad de agua renovable *per cápita* muestra diferencias marcadas entre las trece regiones hidrológico-administrativas (RHA) del país, reflejando contrastes tanto en distribución poblacional como en dotación del recurso. De acuerdo con los valores presentados en la Tabla 1, las regiones con niveles más bajos de agua renovable *per cápita* corresponden a zonas áridas y altamente pobladas del país, mientras que las regiones con mayor disponibilidad se localizan en áreas húmedas con menor densidad demográfica.

Las regiones centro y norte del país, en su mayoría áridas o semiáridas, como Baja California, Baja California Sur, Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Sonora y Tamaulipas, reciben solo el 9% del agua renovable disponible anualmente. Por otro lado, las entidades del sur-sureste, como Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Campeche, Quintana Roo, Yucatán, Veracruz de Ignacio de la Llave y Tabasco, tienen una situación diferente. Estas regiones reciben más de la mitad del agua renovable disponible al año, representando un 67.2%. Sin embargo, a pesar de esta mayor disponibilidad relativa de recursos hídricos, muchas personas en estas áreas carecen de acceso a servicios básicos como agua entubada dentro de sus hogares (Figura 5).

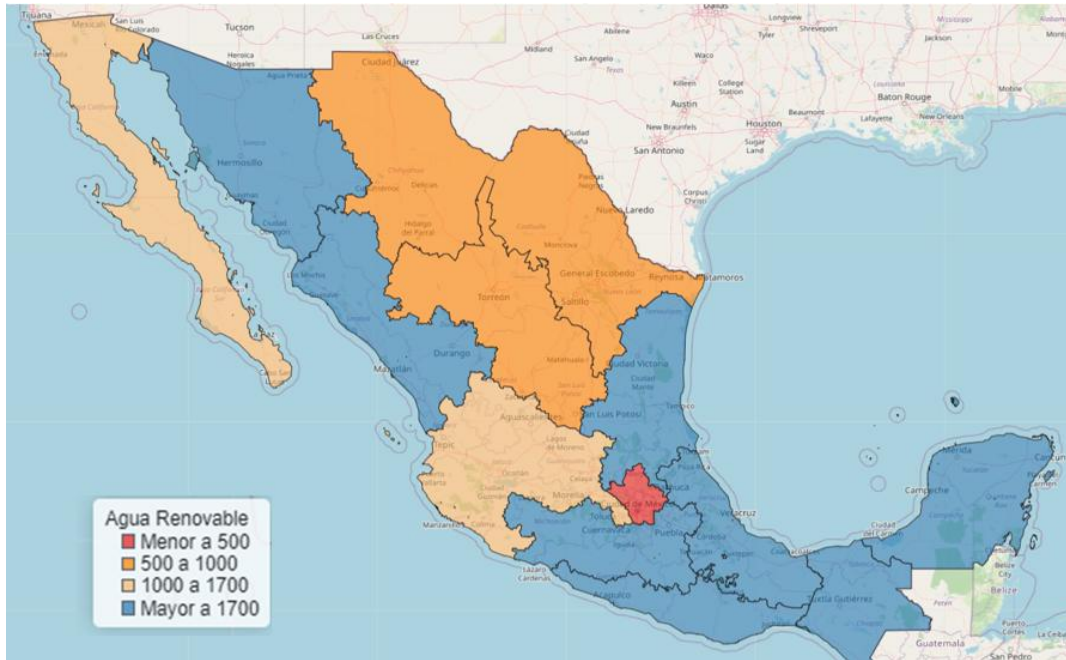


Figura 5. Regiones hidrológico-administrativas y agua renovable per cápita 2021.

Fuente: SINA, 2024.

3.1.2.1 Usos del agua

En México de acuerdo con el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los usos de este recurso, ya sea proveniente de fuentes superficiales o subterráneas, se categorizan en dos grupos principales: consuntivos y no consuntivos. El uso consuntivo implica el consumo real de agua por parte de diversos sectores, como la agricultura, la industria y el consumo humano. Por el contrario, el uso no consuntivo se refiere a la utilización de la energía del agua para actividades como la generación de electricidad mediante plantas hidroeléctricas.

La distinción entre usos es crucial para comprender cómo se utiliza este recurso vital en el país. En la Tabla 2, se muestran los rubros de clasificación con su respectivo volumen concesionado de acuerdo con el grupo perteneciente.

Es importante mencionar que el uso no consuntivo del agua, especialmente en actividades como la generación de electricidad, puede representar una parte significativa del uso total del agua en el país, como sugiere la Figura 6. Esto resalta la importancia de considerar no solo el consumo directo del agua, sino también su papel en actividades que pueden no agotar el recurso pero que aún tienen un impacto en su disponibilidad y calidad.

Tabla 2. Volumen concesionado por categoría de los usos del agua del REPDA 2022.

Usos	Volumen concesionado (hm ³)	%
Usos agrupados consuntivos		
Agrícola	68,515.69	76.29
Público urbano	13,330.25	14.84
Industrial integrado	4,196.80	4.67
Termoeléctricas	3,761.24	4.19
Subtotal consuntivo	89,803.98	100
Usos agrupados no consuntivo		
Hidroeléctricas	177,339.26	
Conservación ecológica	9.46	
Subtotal no consuntivo	177,348.72	
Total consuntivo + no consuntivo	267,152.70	

Fuente: SINA, 2024.

■ Consuntivo ■ No consuntivo

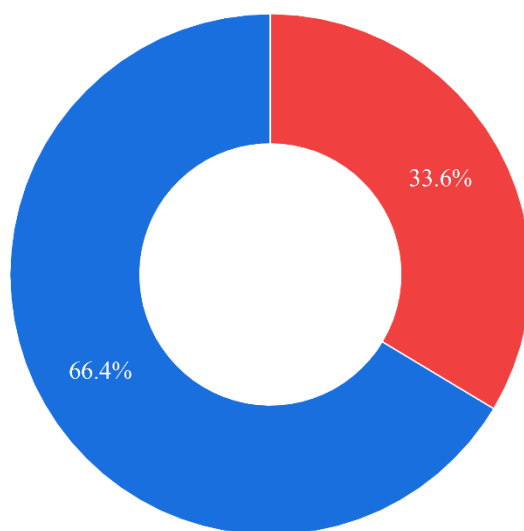


Figura 6. Porcentaje de volumen concesionado por uso consuntivo y no consuntivo.

Fuente: datos tomados del SINA, 2024.

En la clasificación del uso consuntivo del agua, el sector agrícola ocupa la mayor parte del volumen concesionado, representando el 76%. Le sigue el uso público urbano, que constituye el 15% del total, mientras que el sector industrial integrado representa el 5%. Finalmente, las termoeléctricas representan el 4% restante como se muestra en la Figura 7.

■ Agrícola ■ Industrial integrado ■ Público urbano ■ Termoeléctricas

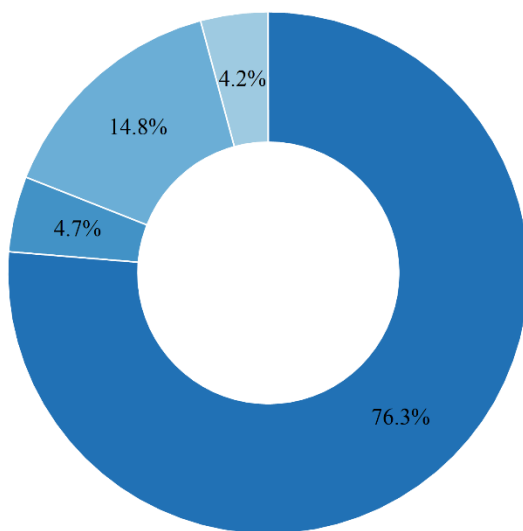


Figura 7. Porcentaje de volumen concesionado de uso consuntivo en México, 2022.

Fuente: datos tomados del SINA, 2022.

3.2 Cuerpos de agua

3.2.1 Tipos de acuíferos

El ciclo hidrológico y variables como la precipitación pluvial, su intensidad, el tipo de terreno y su pendiente, así como la vegetación y el tipo de sedimento, determinan la dirección del agua a través de procesos de infiltración y escorrentía. Esto puede llevar el agua a los cauces de ríos, lagunas, el mar o almacenarla en acuíferos subterráneos (Ward et al. 2015).

De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales (DOF, 1992) en el artículo 3° fracción II define el concepto de acuífero como:

“II. Acuífero: Cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo. (...)”

En estas formaciones geológicas alberga diversos materiales, que van desde gravas de río hasta calizas altamente fracturadas, areniscas porosas poco consolidadas y arenas de playa, e

incluso algunas formaciones volcánicas (Duque, 2022). La composición y estructura influyen en su capacidad para almacenar, liberar y transmitir agua; son determinados por variedad de factores como la porosidad, presencia de fracturas, grado de cementación y compactación son determinantes en este sentido, y varían según las características geológicas específicas de cada área como se muestra en la Figura 8 (Rodríguez y Escalante, 2006).

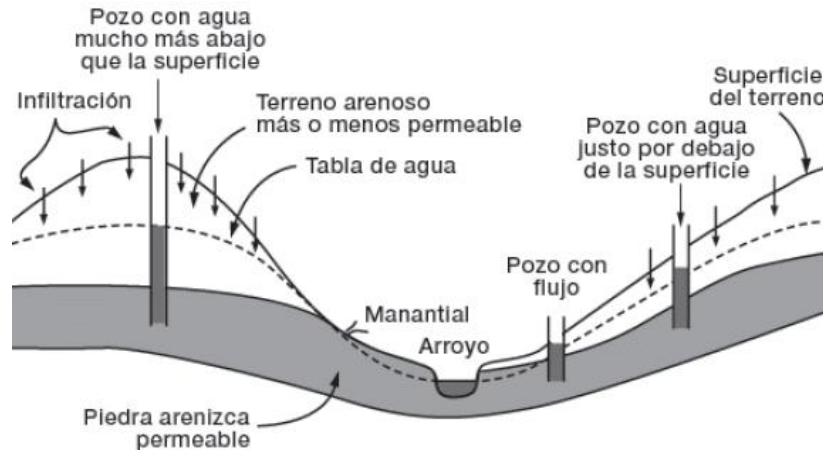


Figura 8. Formaciones geológicas de los acuíferos.

Las zonas de almacenamiento de agua presentan diversos comportamientos, para Rodríguez y Escalante (2006) desde el punto de vista hidráulico, se identifican tres tipos de acuíferos:

1. Acuíferos libres: Su superficie freática se encuentra a presión atmosférica y están delimitados verticalmente por acuicluidos.
2. Acuíferos confinados: Tienen su superficie freática a una presión mayor que la atmosférica y están limitados verticalmente por uno o dos acuitardos, que son capas impermeables. La sobreexplotación de estos acuíferos puede provocar hundimientos y subsidencia del terreno.
3. Acuíferos semiconfinados: Son similares a los confinados, pero con la diferencia de que uno o ambos límites, ya sea el muro, el techo o ambos, no son completamente impermeables y permiten cierta circulación vertical del agua.

El contexto geológico de México es diverso, abarcando una amplia gama de formaciones rocosas que van desde sedimentarias del Cretácico hasta el presente (Sánchez, 2007). Desde la perspectiva hidrogeológica, de acuerdo con la Tabla 3 se identifican siete tipos distintos de acuíferos en el país.

Tabla 3. Tipos de acuíferos en México.

Tipo de Acuífero	Ubicación Geográfica	Características
Calizas del norte	Sierra Madre Oriental	-Espesores variables -Distribución afectada por fallas -Almacenamiento heterogéneo
Cársticos	Noroeste de México	-Profundidades entre 500 y 1500 metros -Baja capacidad de almacenamiento -Alta transmisividad
Riolíticos	Durango, San Luis Potosí, Zacatecas	-Compuestos por rocas riolíticas (ignimbritas) -Permeabilidad influenciada por la composición del suelo
Basálticos	Faja Volcánica Trans-mexicana	-Formados en grandes recipientes volcánicos -Alta permeabilidad asociada con fracturas de alta porosidad
Aluviales	Partes bajas de las cuencas	-Compuestos por materiales clásticos -Los más jóvenes -Sujetos a intensa explotación
Calizas de la Península de Yucatán	Sureste de México	- Alta permeabilidad -Estructura laberíntica -Rendimiento variable debido a la heterogeneidad
Con intrusión marina o salinización	Varias regiones de México	- Altas tasas de evaporación -Disolución de minerales evaporíticos - Presencia de aguas subterráneas salobres

Elaboración: datos tomados de Ward et al. 2015.

3.3 Contaminación de cuerpos de agua

3.3.1 Clasificación de contaminantes

La degradación de la calidad del agua en los ecosistemas acuáticos es un desafío global, lo que plantea la posibilidad de que los recursos hídricos de alta calidad se vuelvan escasos en el futuro (Escalona et al., 2022).

El crecimiento demográfico y la urbanización están ampliamente relacionados con la contaminación del agua. Anteriormente, cuando la densidad de población era baja, los procesos naturales de depuración aseguraban la calidad del agua. Sin embargo, con el aumento de la población y el nivel de vida, la demanda de alimentos, energía y servicios ha crecido significativamente, lo que contribuye a una mayor cantidad de residuos.

Esta situación se agrava en las áreas urbanas, donde los sistemas naturales de recuperación están al límite de su capacidad debido a la carga contaminante (Metcalf y Eddy et al., 2013).

La contaminación puede definirse como la incorporación de elementos en el entorno natural que provocan la pérdida de su utilidad positiva como recurso o causan daños a la salud de los seres vivos o los ecosistemas (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

Dada la diversidad, naturaleza, comportamiento e importancia de los contaminantes del agua, así como sus efectos y riesgos para la salud cuando se trata de agua para consumo, se pueden establecer tres categorías principales en relación con su naturaleza: físicas, químicas y biológicas (Tabla 4), según Metcalf y Eddy et al., (2013) estas variables son fundamentales para determinar los diversos usos del recurso. Cada empleo tiene requisitos específicos de calidad que están determinados por las regulaciones legales establecidas por los países y organismos internacionales pertinentes.

Tabla 4. Clasificación de las características de la calidad del agua.

Grupo	Características de la calidad del agua
Físicas	Turbidez, sólidos suspendidos, olor, temperatura, color
Químicas	Alcalinidad, dureza, conductividad
	Cationes (calcio, magnesio, sodio, potasio), aniones (bicarbonato, cloruros)
	Metales pesados (Arsénico, Cadmio, Plomo, Mercurio, Níquel, Cobre, Zinc, Manganeso, entre otros)
	Compuestos orgánicos naturales (proteínas, carbohidratos, lípidos)
	Compuestos orgánicos sintéticos (derivados de combustibles, plaguicidas, detergentes)
Microbiológicos	Bacterias, virus, protozoarios, parásitos, coliformes fecales

Fuente: datos tomados de Metcalf y Eddy et al., 2013.

3.4 Fuentes de contaminación

Las fuentes de contaminación del agua se pueden clasificar en dos categorías principales (Metcalf y Eddy et al., 2013):

- 1) Naturales: componentes que provienen del contacto del agua con la atmósfera y el suelo durante su flujo a través del entorno natural, se pueden incluir sales minerales, calcio, magnesio, hierro y otros minerales.
- 2) Antropicas: resultado de las actividades humanas, el desarrollo industrial, la agricultura intensiva, el vertido de residuos urbanos y la disposición inadecuada de productos químicos.

Los de origen antrópico, provienen de una gran gama de fuentes, generalmente son los principales factores que afectan la calidad de la mayoría de los cuerpos de agua, principalmente aquellos ubicados cerca de regiones altamente urbanizadas (Wen-Cheng et al., 2011).

Las descargas de aguas residuales se clasifican según su forma de ingresar al medio, dividiéndose en dos categorías: 1) puntuales, que pueden tener origen municipal o industrial, y 2) difusas, que abarcan una variedad de actividades como el drenaje agrícola, el escurrimiento de campos de cultivo o pastizales, la escorrentía de agua de lluvia, las filtraciones en tuberías de combustible o estaciones de servicio, y fugas en sistemas de alcantarillado (Jiménez et al., 2010).

De acuerdo con González et al., (2018), las aguas superficiales son susceptibles de contaminarse fácilmente por fuentes puntuales, a diferencia de las subterráneas, que, a pesar de estar relativamente protegidas contra los riesgos de contaminación gracias a los mecanismos depuradores del subsuelo, siguen siendo vulnerables a la contaminación derivada de las actividades humanas en la superficie del suelo.

Desafortunadamente una vez que el acuífero se contamina, representa mayores desafíos en cuanto a la implementación de técnicas para la detección, monitoreo y remediación de la contaminación que resulta ser un proceso complejo, costoso y con resultados relativamente efectivos (Twarakavi y Kaluarachchi, 2006).

3.5 Impacto y riesgo ambiental

La reducción en la calidad del agua afecta notablemente la estructura y distribución de las poblaciones acuáticas. Los impactos adversos de esta disminución en los organismos acuáticos se desarrollan gradualmente, desde respuestas individuales a nivel bioquímico y fisiológico hasta respuestas poblacionales, comunitarias y ecosistémicas (Strayer y Dudgeon, 2010). La magnitud de estos cambios en los organismos depende del tiempo, la intensidad y la naturaleza de la perturbación de las condiciones iniciales del ecosistema acuático, Por ende, ha habido un notable incremento en la aplicación de métodos para evaluar la calidad del agua a nivel global, empleando el análisis de las comunidades biológicas (Damanik et al., 2016).

Dentro de los contaminantes fisicoquímicos la problemática se asocia a una alta durabilidad en el ambiente que está influenciada por factores climáticos como la humedad, la radiación

solar, la temperatura, el viento y la presencia de partículas absorbentes, como arcillas y materia orgánica (Ohura et al., 2013).

Un claro ejemplo de esta influencia climatológica se observa claramente en relación con la difusión de jales mineros hacia su entorno. Se pueden observar diversas situaciones según el clima de la región, en zonas lluviosas, esta problemática ambiental está relacionada con la generación de drenaje ácido y su dispersión a través de los escurrimientos superficiales (hídrica), mientras que, en áreas áridas, se debe principalmente al viento (dispersión eólica). El drenaje ácido, generado por la oxidación de los sulfuros metálicos, se caracteriza por tener valores bajos de pH y altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos disueltos (Moncur et al. 2004). Estas soluciones pueden convertirse en un problema ambiental severo al contaminar suelos, sedimentos, aguas superficiales y subterráneas (Armienta et al. 2001., Jung, 2001).

De acuerdo con Matthews (2015) el uso excesivo de plaguicidas en actividades agrícolas para controlar plagas perturba el equilibrio natural de la flora y fauna en los ecosistemas, lo que genera daños significativos para procesos biológicos como el reciclaje de nutrientes. Además, cuando los organismos productores o consumidores primarios ingieren compuestos clorados, estos se incorporan directamente a la cadena alimentaria acuática (Lee et al., 2001; Leyva-Cardoso et al., 2003; Singh et al., 2005).

Por otro lado, se encuentran los contaminantes de origen microbiológico. Los microorganismos indicadores de contaminación, como los coliformes totales, coliformes fecales, *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*, se utilizan comúnmente como señales de advertencia sobre posibles alteraciones en la calidad del agua. En áreas donde se practica la ganadería, o el riego de suelos agrícolas con aguas residuales, el riesgo de contaminación biológica es más alto, ya que los patógenos presentes en las heces y la orina de los humanos y animales pueden ser transportados por infiltración hacia los cuerpos de agua (OMS, 2012, García y Iannacone 2014). El ingreso de materia orgánica al agua subterránea puede provocar cambios notables en las comunidades microbianas autóctonas y alteraciones en su calidad higiénica (Martín, 2004), con implicaciones serias para el ambiente y los organismos.

3.6 Riesgos asociados a la salud humana

A nivel mundial, la contaminación del agua tiene grandes riesgos para la salud pública; según datos de la OMS, solo el 41% de la población mundial tiene acceso a agua purificada y desinfectada, lo que se considera como agua "segura". Para México, existen instrumentos de política pública que regulan los requerimientos indispensables para el agua potable destinada al consumo humano, la NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2022) y la NOM-230-SSA1-2002 (DOF, 2005), señalan que se caracteriza por no tener contaminantes de ninguna clasificación que puedan provocar algún tipo de daño a la salud humana.

De acuerdo con García (2002), los mecanismos de transmisión de las enfermedades pueden ser: directamente, mediante la ingestión de agua contaminada, ya sea de sistemas de suministro de agua de grandes poblaciones o de pozos contaminados. Indirectamente, el agua puede servir como vehículo de infecciones o cuando las enfermedades pueden transmitirse a través de alimentos contaminados debido al riego con aguas residuales como los moluscos que pueden acumular altos niveles de patógenos y ser transmitidos a los seres humanos.

Los contaminantes de agua dulce incluyen sustancias químicas simples (metales y metaloides como arsénico, fluoruro, plomo, cadmio, cromo y mercurio) o complejas (nutrientes, pesticidas y compuestos orgánicos), además de microorganismos bacterianos, virales, fúngicos y parasitarios. La vulnerabilidad de las personas a contraer alguna infección está condicionada por diversos factores que pueden influir altamente en las condiciones de riesgo asociadas, como la edad, la higiene personal, la acidez gástrica (que sirve como barrera para muchos patógenos), la motilidad intestinal (que favorece la eliminación de microorganismos al evitar su colonización) y la inmunidad (García, 2002).

Se calcula que alrededor de 1,800 millones de personas en todo el mundo consumen agua contaminada con heces fecales (Bain et al. 2014). El 80 % de las enfermedades infecciosas y parasitarias gastrointestinales están relacionadas con el uso y consumo de agua insalubre, se estima que 829,000 personas mueren cada año lo que representa aproximadamente una tercera parte de las defunciones atribuidas a esta causa (OMS 2022).

Los efectos adversos de los contaminantes en el agua se evidencian en las altas tasas de enfermedades diarreicas agudas y la mortalidad infantil, esta situación afecta principalmente a las áreas rurales. El consumo continuo de agua contaminada por los niños también puede resultar en desnutrición y retrasos en el desarrollo psicomotor (Owino et al, 2016).

Entre las sustancias químicas que representan un alto riesgo para la salud de la población se encuentran metales pesados, compuestos radiactivos, insecticidas, fertilizantes, hidrocarburos derivados del petróleo, desechos tóxicos industriales, productos de limpieza, medicamentos legales e ilegales, entre otros (Metcalf y Eddy et al., 2013).

Dentro de los contaminantes químicos potencialmente peligrosos está el As, un elemento existente en la corteza terrestre y distribuido en el ambiente a través de procesos naturales y algunas actividades antrópicas, se encuentra en forma inorgánica y orgánica. La contaminación de aguas subterráneas por sales de As inorgánico (As_i) origina lo que se conoce como hidro arsenicismo regional endémico (USEPA 2006). Se ha estimado que más de 100 millones de individuos en el mundo están expuestos a concentraciones elevadas de As_i a través del agua de bebida proveniente de pozos profundos (Mukherjee et al.2007).

Las especies químicas de As tienen una tendencia a concentrarse en órganos con una alta irrigación sanguínea, como el hígado, los riñones, los pulmones y la vejiga. En menor medida, también se acumulan en tejidos que contienen una cantidad significativa de grasas, como el tejido adiposo y el cerebro (Hughes et al. 2000, Rodríguez et al. 2005, Paul et al. 2007). Por su semejanza química con el fósforo y As también puede depositarse en huesos y dientes, por lo que el organismo puede retenerlo por largos periodos (ATSDR, 2007).

Además, este elemento tiene la capacidad de moverse dentro de algunas plantas y acumularse en partes comestibles, lo que aumenta la exposición de las personas que las consumen a través de la cadena alimentaria (Ali et al., 2013).

3.7 Marco legal

3.7.1 Principales disposiciones jurídicas en México

Desde 1973, México ha buscado proteger la calidad del agua mediante la implementación de legislación en materia ambiental. Aunque se establecieron bases para el monitoreo de descargas de residuos y la clasificación de cuerpos de agua, la falta de apoyo económico y voluntad política obstaculizó estos esfuerzos. A partir de 1982, se establecieron normativas más específicas, pero su baja aplicación limitó su efectividad. En 1996, se implementó un nuevo marco legal para controlar la contaminación gradualmente y establecer metas de tratamiento. Estas regulaciones han permitido duplicar la cantidad de agua tratada en el país

desde entonces, con perspectivas de aumentar aún más el tratamiento de agua residual, especialmente en áreas urbanas como la Ciudad de México (Jiménez et al., 2010).

Actualmente, el sistema de gestión del agua en México está centralizado (Tabla 5), cada estado tiene la responsabilidad de regular el aprovechamiento, uso y vigilancia de las aguas dentro de su jurisdicción. Esto incluye la implementación de normativas estatales y la provisión de servicios de agua potable y saneamiento a nivel municipal. Además, las autoridades estatales deben cumplir con las funciones establecidas por la CONAGUA, como la ejecución de programas operativos para mejorar la infraestructura hidroagrícola y los sistemas de agua potable y saneamiento en zonas rurales y urbanas. Para llevar a cabo estas responsabilidades, la mayoría de los estados han establecido Comisiones Estatales del Agua.

Tabla 5. Principales disposiciones jurídicas en materia de agua.

En la Constitución	
Fracciones más relevantes I, III, IV, V y VI del artículo 27; el artículo 73, fracción XVII, y el artículo 115, fracción III, inciso A.	
Artículo 27	Establece las reglas sobre quién tiene derechos sobre las aguas en México. Según esta normativa, las aguas que pertenecen al dominio público se consideran como un recurso que no puede ser vendido o transferido, aunque su uso puede ser concedido a individuos o empresas mediante permisos especiales.
Artículo 73	Establece las responsabilidades de las autoridades en la regulación y protección de las aguas, así como la preservación de su cantidad y calidad. Además, otorga al Congreso de la Unión la facultad de crear leyes relacionadas con el uso y aprovechamiento de las aguas bajo jurisdicción federal.
Artículo 115	Mediante una reforma realizada el 5 de febrero de 1983, se delegó la responsabilidad del gobierno federal de brindar servicios de agua potable, alcantarillado, tratamiento y eliminación de aguas residuales a los municipios.
Ley de Aguas Nacionales	
La Ley de Aguas Nacionales en México, promulgada en 1992, es la normativa más importante que regula el uso, aprovechamiento, distribución y control de las aguas continentales en el país. Derivada de diversas leyes previas, fue objeto de una amplia reforma en 2004 que implicó modificaciones significativas en su estructura y disposiciones. Esta ley establece las bases legales para la participación del sector privado en la gestión del agua y otorga a los gobiernos estatales y municipales la responsabilidad de vigilar el cumplimiento de las normas de calidad del agua y aplicar sanciones en caso de incumplimiento.	
Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente	
El artículo 119 bis establece que los gobiernos estatales y municipales son responsables de vigilar el cumplimiento de las NOM en la prevención y control de la contaminación del agua. También deben exigir a quienes generen vertidos hacia los sistemas de agua que instalen sistemas de tratamiento si no cumplen con estas normativas. Además, tienen la facultad de determinar los montos de los derechos correspondientes para llevar a cabo el tratamiento necesario y aplicar sanciones en caso de incumplimiento.	
Leyes estatales	

El sistema de gestión del agua en México está centralizado, pero cada estado tiene la responsabilidad de regular el aprovechamiento, uso y vigilancia de las aguas dentro de su jurisdicción. Esto incluye la implementación de normativas estatales y la provisión de servicios de agua potable y saneamiento a nivel municipal. Además, las autoridades estatales deben cumplir con las funciones establecidas por la CONAGUA, como la ejecución de programas operativos para mejorar la infraestructura hidroagrícola y los sistemas de agua potable y saneamiento en zonas rurales y urbanas. Para llevar a cabo estas responsabilidades, la mayoría de los estados han establecido Comisiones.

Fuente: Gutiérrez y Emanuelli 2010.

3.7.2 Normas Oficiales Mexicanas

Debido a la transversalidad del sector hídrico, existen diversas normas aplicables al tema del agua, el cuadro proporciona un resumen de algunas de las más importantes. Es fundamental recordar que, de acuerdo con la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, las NOM (Tabla 6) son de obligatorio cumplimiento, mientras que las NMX son de adopción voluntaria.

Tabla 6. Principales Normas Oficiales Mexicanas en materia de agua.

Descargas de aguas residuales, prevención y el control de la contaminación, emitidas por la SEMARNAT	
NOM-001-SEMARNAT-2021	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
NOM-002-SEMARNAT-2021	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
NOM-003-SEMARNAT-1997	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.
Calidad del agua para consumo humano, emitidas por la SSA	
NOM-127-SSA1-2021	Establece límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
NOM-230-SSA1-2002	Establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.
Sistemas hidráulicos y mantenimiento (agua potable y pozos), emitidas por la CONAGUA	
NOM-001-CONAGUA-2011	Sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario-Hermeticidad-Especificaciones y métodos de prueba.
NOM-003-CONAGUA-1996	Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos.
NOM-004-CONAGUA-1996	Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general.

Fuente: datos tomados de las NOM.

4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

México es un país vulnerable al cambio climático y a los fenómenos extremos que este provoca, con ello se suman la sobreexplotación, la contaminación y la falta de gestión efectiva del agua (IMCO, 2023). La carencia de información detallada y actualizada sobre los cuerpos de agua de agua vulnerables representa una serie de desafíos sobre los recursos hídricos en México, situación que se ha agravado por el reconocimiento tardío de este deterioro, por lo que los problemas de calidad del agua en el país son graves (Espinal et al., 2013) y con graves pasivos ambientales desde el siglo anterior.

La contaminación constituye una de las principales preocupaciones que inciden en la accesibilidad del recurso hídrico destinado al consumo humano. Los acuíferos subterráneos, fundamentales para el abastecimiento de agua potable, están siendo afectados por una variedad de agentes contaminantes derivados de actividades urbanas, industriales, agrícolas y mineras.

Después de que un acuífero se ha contaminado, aplicar técnicas para detectar, monitorear y remediar la contaminación se vuelve un proceso complicado, costoso y solo parcialmente efectivo. Por esta razón, se ha destacado la importancia de la prevención de la contaminación, la cual presenta variaciones geográficas significativas. En consecuencia, se deben desarrollar estrategias de mitigación con los recursos, las tecnologías y las estrategias hacia las zonas que presentan una mayor vulnerabilidad ante la contaminación. (Twarakavi y Kaluarachchi, 2006).

En México existen bases de datos realizadas por CONAGUA, donde se monitorean algunos factores intrínsecos como las variables geomorfológicas, físicas y químicas, desafortunadamente no se toman en cuenta factores extrínsecos que ejercen presión sobre el recurso hídrico como las actividades humanas o el crecimiento demográfico, por mencionar algunos, estos elementos pueden volverse una amenaza para el desarrollo económico, social y ecosistémico.

La comprensión de la interacción de estos factores a nivel global permite evaluar la vulnerabilidad y la gestión de estos, para ello se requiere de un análisis integral que permita visualizar oportunamente la problemática para abordar estos desafíos de manera conjunta.

5 JUSTIFICACIÓN

El enfoque integral y basado en evidencia científica responde a la necesidad de abordar los desafíos actuales y futuros relacionados con el agua en México. La integración de tecnología y conocimientos científicos no solo implica el uso de herramientas tecnológicas, sino también la comprensión de cómo estas pueden combinarse de manera coordinada para tomar decisiones estratégicas y fundamentadas.

El eje principal de este estudio es identificar los puntos vulnerables de contaminación utilizando la base de datos de CONAGUA y analizando las variables que influyen en la dispersión de contaminantes. Además, se propondrá la aplicación de métodos de predicción para entender la evolución de los contaminantes en el tiempo. Este enfoque permitirá desarrollar estrategias efectivas para mitigar los impactos negativos de la contaminación del agua, contribuyendo así a la protección y conservación de los recursos hídricos en el país.

6 OBJETIVOS

6.1 General

Evaluar la contaminación y persistencia de metales pesados de acuíferos de México.

6.2 Específicos

1. Identificar los puntos focales de contaminación de cuerpos de agua con base a los datos de Conagua.
2. Mapear la zona de los cuerpos de agua a través de Sistemas de Información Geográfica.
3. Analizar las variables que intervienen en la dispersión de contaminantes en los cuerpos de agua.
4. Predecir la evolución de los contaminantes de los cuerpos de agua con el método Monte Carlo.

7 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL

Las técnicas aplicadas en este estudio se determinaron con base en los Objetivos Específicos (O.E.) a través de metodologías mixtas con enfoque cualitativo y cuantitativo como se muestra en la Figura 9.

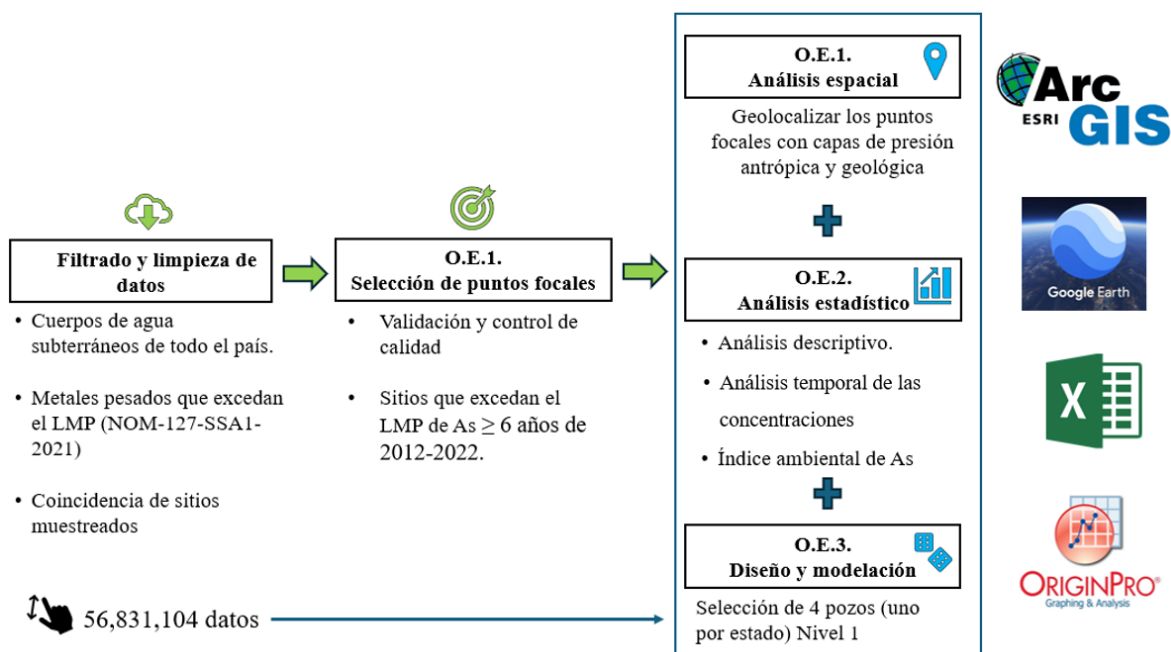


Figura 9. Diagrama de la metodología.

8 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental propuesto consta de las siguientes etapas para el análisis de la contaminación del agua y la evaluación de su riesgo ambiental en México:

1. Recopilación y uso de bases de datos

Búsqueda bibliográfica con las siguientes palabras clave: Contaminación del agua, Metales pesados, Calidad del agua, Monitoreo ambiental, Índice de Calidad del Agua (ICA), Concentraciones de contaminantes, Impacto ambiental, Análisis GIS, Modelos de dispersión, Modelos Monte Carlo, Agua potable, Recursos hídricos, Gestión del agua, Normativas ambientales, Salud pública. Los datos recopilados se validarán en todo momento mediante la revisión de revistas indexadas en JCR, Scopus y Clarivate.

2. Selección de puntos focales

Uso de datos de la red de vigilancia de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024) para los años 2019, 2020 y 2021, en relación con 675 pozos distribuidos en diversas regiones del país. Se seleccionarán los pozos que excedan los Límites Máximos Permitidos de calidad del agua, de acuerdo con lo establecido en la normativa NOM-127-SSA1-2021 sobre Agua para uso y consumo humano.

3. Análisis espacial

Se utilizará el software ArcGIS para geolocalizar los pozos focales para visualizar su distribución espacial en un mapa. Esta aplicación permitirá identificar patrones espaciales y áreas de mayor concentración de contaminantes en diferentes ubicaciones para a identificar posibles fuentes de contaminación o áreas de influencia.

4. Análisis estadístico

La elección de los métodos estará condicionada por la disponibilidad de los datos y variará según el objetivo de cada análisis.

Análisis temporal de la concentración de contaminantes: para evaluar cómo han fluctuado los niveles de contaminantes a lo largo del tiempo en cada pozo, se realizó un análisis temporal de las concentraciones anuales. Este análisis, mediante el uso de gráficas, permitió identificar variaciones y patrones generales en los niveles de contaminantes a lo largo de los años en cada ubicación, con fines descriptivos y comparativos.

5. Diseño y modelación

Se desarrollará el modelo Monte Carlo para predecir la evolución de los contaminantes en los cuerpos de agua a lo largo del tiempo. Este modelo permitirá realizar simulaciones probabilísticas para evaluar diferentes escenarios y estimar el riesgo ambiental asociado a la presencia de metales pesados.

9 MATERIAL

9.1.1 Software

Para el tratamiento y análisis de datos, se utilizaron:

Microsoft® Excel® para Microsoft 365 MSO (versión 2410, compilación 16.0.18129.20158) de 64 bits. Este software permite la manipulación eficiente de grandes

volúmenes de datos mediante herramientas como fórmulas avanzadas, tablas dinámicas, filtros personalizados y gráficos interactivos. Además, su compatibilidad con hojas de cálculo de gran tamaño facilita la consolidación de los datos provenientes de múltiples años en una estructura única y coherente.

ArcGIS Desktop 10.8 (Esri) permite el análisis geoespacial y la visualización de datos en mapas digitales. Este software se utiliza para representar información espacial de manera precisa, empleando herramientas avanzadas de simbología, análisis espacial y diseño cartográfico. Además, facilitar la integración de datos hidrogeoquímicos con información geográfica, lo que lo convierte en una herramienta clave para analizar relaciones espaciales y patrones geográficos en el contexto de recursos hídricos.

9.2 Captura de Información

En este proyecto se empleó una base de datos con características cualitativas y cuantitativas elaborada por la red de vigilancia de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024), descargada de su página oficial bajo el nombre de “Todos los Monitoreos”. Esta base incluye información sobre las ubicaciones de sitios de muestreo distribuidos en todos los estados de México, abarcando los años 2012 a 2023. Contiene registros de 446 parámetros ambientales y 127,424 muestreos clasificados en los siguientes tipos de cuerpos de agua: subterráneo, léntico, lótico y costero.

9.3 Estructura de la Base de Datos

La base de datos, denominada "Todos los Monitoreos", está organizada en tres hojas principales: Sitios, Resultados, y Simbología. Cada una agrupa información clave para el análisis de la calidad del agua en México y permite relacionar las características de los sitios, los datos de monitoreo y su interpretación. La información está estructurada en columnas que describen las características de los sitios de muestreo y las condiciones ambientales correspondientes, permitiendo un análisis detallado de los datos cualitativos y cuantitativos registrados por la red de vigilancia de la CONAGUA. A continuación, se describen las características principales de cada una de las hojas:

Hoja: Sitios. Contiene información general de los sitios de muestreo. La estructura de las columnas es la siguiente:

Tabla 7. Estructura de la hoja de sitios.

Columna	Descripción
Clave del sitio	Identificador único del sitio de monitoreo.
Nombre del sitio	Nombre oficial del sitio de muestreo.
Cuenca	Nombre de la cuenca hidrológica.
Clave acuífero	Código del acuífero asociado.
Acuífero	Nombre del acuífero relacionado.
Organismo cuenca	Organización responsable de la gestión de la cuenca.
Dirección local	Oficina o delegación local encargada del monitoreo.
Estado	Entidad federativa donde se encuentra el sitio.
Municipio	Municipio del sitio de muestreo.
Cuerpo de agua	Nombre del cuerpo de agua monitoreado.
Tipo de cuerpo de agua	Clasificación general del cuerpo de agua (subterráneo, léntico, lóxico, costero).
Subtipo cuerpo agua	Subclasificación específica del cuerpo de agua (río, lago, laguna).
Latitud	Coordenada geográfica norte-sur del sitio.
Longitud	Coordenada geográfica este-oeste del sitio.

Hoja: Resultados. Incluye los datos recolectados durante los monitoreos. La estructura de las columnas es:

Tabla 8. Estructura de la hoja de resultados.

Columna	Descripción
Clave del sitio	Identificador único que vincula los resultados con la hoja de sitios.
Clave monitoreo	Código único del evento de monitoreo.
Nombre del sitio	Nombre del sitio donde se realizó el monitoreo.
Tipo cuerpo de agua	Clasificación general del cuerpo de agua.
Fecha realización	Fecha en que se llevó a cabo el monitoreo.
Año	Año del monitoreo.
Parámetros medidos	446 columnas adicionales que contienen valores de parámetros físicos, químicos y biológicos.

Hoja: Simbología. Proporciona información para interpretar los parámetros registrados en los resultados. Su estructura es:

Tabla 9. Estructura de la hoja de simbología.

Columna	Descripción
Parámetro clave	Código único asignado a cada parámetro medido.

Nombre parámetro	Nombre del parámetro monitoreado (p. ej., pH, DBO, nitratos).
Unidad de medida	Unidad en la que se mide cada parámetro (por ejemplo, mg/L, µg/L).

10 METODOLOGÍA

La selección y limpieza de los datos en la hoja Resultados de la base de datos se llevó a cabo en seis etapas, asegurando la pertinencia de la información utilizada para el análisis de calidad del agua subterránea. A continuación, se describen los procedimientos implementados en cada etapa:

10.1 Etapa 1: Criterios de filtrado y limpieza de los datos

Selección de Datos Subterráneos: se filtraron exclusivamente los registros correspondientes a cuerpos de agua subterráneos, eliminando los datos de cuerpos lénticos, lóticos y costeros. Este criterio se implementó para centrar el análisis en las características específicas del agua subterránea.

Separación por años: los registros se organizaron en hojas independientes para cada año (2012-2023), con el propósito de evaluar si existía una disparidad en el número de celdas-muestras entre los años o si la cantidad de datos permanecía constante.

Selección de Parámetros Relevantes: de los 446 parámetros originales, se eliminaron aquellos que no estaban relacionados con la NOM-127-SSA1-2021 para metales y metaloides, quedando seleccionados únicamente los parámetros indicados en la normativa (Tabla 10). Estos LMP fueron utilizados como referencia para identificar los sitios que excedieron dichos valores durante el análisis de los datos.

Esta selección permitió enfocar el análisis exclusivamente en los metales y metaloides críticos para la calidad del agua subterránea, optimizando la interpretación de los resultados y asegurando la alineación del proyecto con los estándares normativos aplicables.

Tabla 10. Especificaciones Sanitarias de Metales y Metaloides de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021.

Parámetros	LMP	Unidades
Aluminio	0.2	mg/L
Arsénico	0.025	mg/L
Bario	1.3	mg/L
Cadmio	0.005	mg/L

Cobre	2	mg/L
Cromo	0.05	mg/L
Hierro	0.3	mg/L
Manganeso	0.15	mg/L
Mercurio	0.006	mg/L
Níquel	0.07	mg/L
Plomo	0.01	mg/L
Selenio	0.04	mg/L

10.2 Etapa 2: Análisis de coincidencias y comportamientos constantes

Análisis de coincidencias de sitios: se identificaron los sitios que estuvieron presentes en los muestreos durante todo el período 2012-2023, utilizando fórmulas en Excel para encontrar coincidencias en la columna Clave Sitio.

Evaluación de Límites Máximos Permisibles: se analizaron los resultados de los sitios identificados en el paso anterior para determinar si excedían los LMP establecidos en la NOM-127-SSA1-2021. Este análisis se realizó mediante fórmulas que compararon los valores registrados con los límites normativos de cada metal pesado.

Criterio de selección: se seleccionaron únicamente los sitios que superaron al menos un LMP en 6 años o más del período de 12 años analizado (2012-2023). Este criterio permitió identificar comportamientos constantes en el incumplimiento de la normativa.

Finalmente se obtendrá una hoja consolidada de análisis que integra los datos filtrados y seleccionados de las etapas previas. Esta hoja incluye únicamente los sitios que exceden al menos un LPM de los 12 metales pesados seleccionados en 6 años o más del periodo 2012-2023. La hoja organizada permite realizar análisis específicos sobre el comportamiento anual de la concentración, ubicaciones críticas y superposición de parámetros rebasados.

10.3 Etapa 3: Identificación de sitios y metales prioritarios

Identificación de estados y acuíferos: con base en los resultados de la Etapa 2, se identificaron los estados y acuíferos que presentaron la mayor cantidad de sitios que superaron los LMP en 6 años o más.

Análisis nacional de metales pesados: para cada uno de los 12 metales pesados, se identificaron los sitios con los niveles más altos a nivel nacional durante el período 2012-2023.

Coincidencia de límites rebasados: se identificaron los sitios que excedieron los LMP de 2 o más metales pesados en los registros, destacando aquellos que representaban los mayores riesgos acumulativos.

Selección de puntos focales: identificar sitios clave (puntos focales) basados en su relevancia para políticas de intervención, considerando: la constancia del incumplimiento.

10.4 Etapa 4: Criterio de acotación

A partir de los resultados de las etapas 1-3 se establecieron tres filtros sucesivos para delimitar el tamaño de muestra asegurando la robustez estadística y la representatividad espacial.

Selección del metal principal: el As presentó el mayor número de pozos con datos continuos que superan los LMP en ≥ 6 años.

Acuíferos sobreexplotados: se realizó un cruce espacial entre dichos sitios y los polígonos oficiales de acuíferos sobreexplotados, publicados por CONAGUA. Este análisis permitió determinar cuántos de los pozos con concentraciones de As superiores a 0.025 mg/L durante seis años o más se encuentran localizados dentro de unidades hidrogeológicas reconocidas como sobreexplotadas, conforme al último Informe de Disponibilidad de Agua Subterránea.

Filtrado geográfico por tamaño de muestra: se definió un umbral mínimo de 9 pozos por estado. Solo aquellos estados que superaron este umbral se mantuvieron en el estudio y se graficaron los promedios anuales de concentración para identificar el comportamiento anual de contaminación entre 2012 y 2022.

10.5 Etapa 5: Índice Ambiental de As (IAA)

El objetivo de esta etapa es evaluar la severidad de As en cada pozo a través del diseño y elaboración propia del IAA que integra tres indicadores: magnitud media, magnitud extrema y la persistencia en el tiempo.

10.5.1 Indicadores que componen el IAA

1. Concentración promedio anual de As (As_{prom})

Indica el nivel medio de exposición calculado como la media aritmética de las concentraciones anuales de As.

2. Concentración máxima registrada de As ($As_{m\acute{a}x}$)

Indica el muestreo pico con mayor concentración de As mg/L durante el periodo de estudio.

3. Número de años con As > 0.05 mg/L ($N_{>0.05}$)

Indica cuántos años en el rango 2012–2022 superaron el umbral de 0.05 mg/L.

10.5.2 Fórmula

$$IIA = As_{prom} \times As_{m\acute{a}x} \times N_{>0.05}$$

10.5.3 Clasificación por niveles de severidad

Tabla 11. Clasificación de niveles de severidad del IAA en pozos.

Nivel	Intervalo	As_{prom} (mg/L)	$As_{m\acute{a}x}$ (mg/L)	Severidad de la contaminación
1 (Crítico)	> 0.30	0.07 – 0.12	0.5 – 1.2	Muy alta: persistencia prolongada, concentraciones medias y picos elevados. Máxima atención.
2 (Moderado)	0.10 – 0.30	0.05 – 0.07	0.3 – 0.5	Media: concentraciones intermedias frecuentes. Seguimiento para evitar escalar a Nivel 1.
3 (Persistente)	≤ 0.10	0.03 – 0.05	0.1 – 0.3	Baja: aunque crónica, presenta menores picos o pocos años de exceso.

Nota: Todos los pozos incluidos superan el LMP de 0.025 mg/L (NOM) y el recomendado de 0.01 mg/L (OMS). La clasificación definitiva responde exclusivamente al valor del IAA.

10.6 Etapa 6: Representación espacial del IAA y factores de presión

Después de haber calculado el IAA para cada pozo, se realizó su representación espacial mediante Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS®). Este análisis permitió visualizar la distribución geográfica de los niveles de severidad en los cuatro estados seleccionados: Durango, Guanajuato, Coahuila y Zacatecas

Posteriormente, se integraron distintas capas temáticas de presión ambiental con objetivo de identificar patrones de coincidencia entre la severidad del As e influencia potencial de factores de presión.

Las capas fueron clasificadas en dos grupos según su origen:

- Factores de presión antrópica:
 - ✓ Acuíferos sobreexplotados (CONAGUA)
 - ✓ Zonas metropolitanas (INEGI)
 - ✓ Sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU)
 - ✓ Zonas mineras (SGM)
- Factores de presión geológica:
 - ✓ Estructuras volcánicas (como conos de ceniza)
 - ✓ Zonas con subsidencia inducida (por extracción de agua o fluidos subterráneos)

Además de la capa base de principales ríos para ubicar los pozos en relación con la red hidrográfica regional.

10.7 Etapa 7: Selección de pozo representativo por estado

Por cada estado se eligió un pozo representativo para la Simulación Monte Carlo bajo los siguientes criterios:

1. Filtrado: solo los pozos con IAA Nivel 1 (> 30), clasificándolos de mayor a menor.
2. Selección: el primero siendo el máximo registrado.

10.8 Etapa 8: aplicación de simulación Monte Carlo

En esta sección se describen a detalle los pasos que se siguieron para simular la evolución de las concentraciones de As en el tiempo mediante el modelo de Monte Carlo; aplicando dos métodos diferentes con el fin de comparar la flexibilidad, el control de las fórmulas y la eficiencia temporal de cada método. Ambos con ayuda del software Origin Pro-versión 2025.

En el primero de ellos consiste en la simulación mediante construcción manual de algoritmo adaptativo, mediante un ajuste y generación de muestras en hojas de cálculo, donde se estiman paso a paso los parámetros de la distribución log-normal (μ y σ) y se incorporan los

resultados año a año. En el segundo, se aprovecha la función integrada de Monte Carlo en Origin, que automatiza el proceso de cadena adaptativa con los mismos parámetros iniciales. En ambos casos, se parte de las concentraciones históricas anuales de As registradas entre 2012 y 2022, previamente depuradas de valores atípicos, y se generan 10,000 iteraciones para cada año proyectado (2023–2028).

10.8.1 Simulación mediante construcción manual de algoritmo adaptativo

Esta metodología consta de un total de 6 pasos con las instrucciones de ejecución para Origin Lab.

Paso 1: Preparación de los datos

- Consolidar las concentraciones anuales de As (2012–2022) en una sola columna.
- Tratamiento de outliers: cada valor atípico se reemplaza por el promedio del año anterior y el siguiente

Paso 2. Estimación de parámetros para la log-normal

Se ajusta la distribución log normal para obtener los parámetros iniciales: μ y σ

- Se seleccionan los 11 datos de concentraciones de As de la hoja de cálculo.
- Menú en Origin: Statistics → Distribution Fit → Open Dialog... → Llenado de datos de ventana: Solo se modifica la pestaña de Distributions: LogNormal

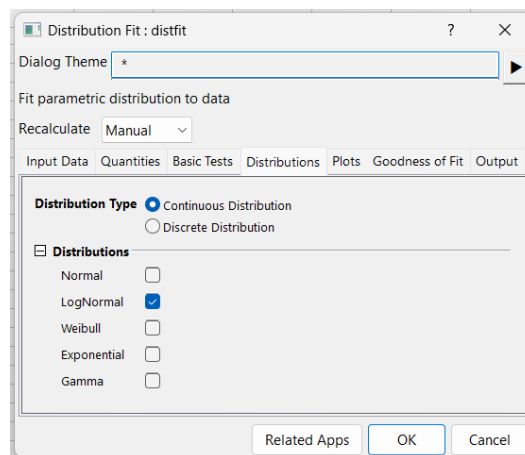


Figura 10. Ventana de ajuste de distribución en Origin

Paso 3: Simulación del primer año

En una nueva hoja se nombra la primer columna Año_2023 y generan 10,000 iteraciones utilizando el generador de números aleatorios gaussianos estándar.

$$\text{Ecuación: } X_t = \exp(\mu + \sigma * Z) \quad \text{En Origin Lab: } \exp(\mu + \sigma * \text{grnd}())$$

donde:

- μ = es la media de la variable transformada mediante logaritmo natural.
- σ = es la desviación estándar de la misma variable.
- $Z = \text{grnd}()$ en Origin (valor normal aleatorio estándar)

Comando en Origin: Column \rightarrow Set Column Values \rightarrow Llenado de datos de ventana: Se pone de 1 a 10000 que serán nuestras iteraciones, se agrega la fórmula $\exp(\mu + \sigma * \text{grnd}())$ con los respectivos resultados obtenidos de la hoja Dist1 derivados de la ejecución del Paso 2 inciso b.

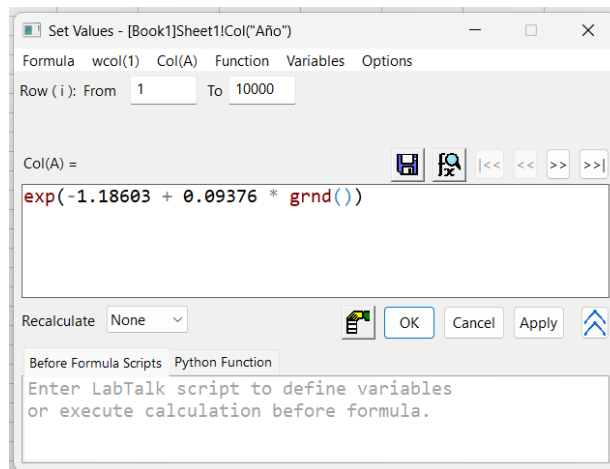


Figura 11. Simulación con la función de números aleatorios gaussianos estándar de Origin.

Paso 4: Cálculo del primer año

Las 10,000 simulaciones del paso 3 (Año_2023), representan posibles valores anuales de concentración. Para obtener un valor representativo de la concentración para 2023 se saca la mediana de estas iteraciones.

Comando en Origin: Column \rightarrow Set Column Values \rightarrow Llenado de datos de ventana: se agrega la fórmula **mean(col(A))** siendo “A” la columna donde se encuentran nuestras 10000 iteraciones del paso 3 (Año_2023).

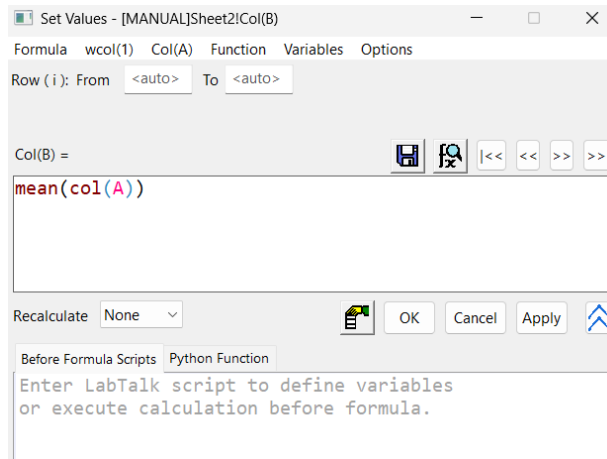


Figura 12. Cálculo de la media para el primer año simulado.

Paso 5: Actualización de parámetros de log normal (μ , σ)

- Incorporar la media de 2023 al conjunto histórico (datos 2012–2023).
- Se recalcula μ_{2023} y σ_{2023} incluyendo ese nuevo dato (igual que en el Paso 2).

Paso 6: Cadena adaptativa con reestimación anual

Se simula el valor de cada año $t+1$ utilizando una distribución log-normal cuyos parámetros μ y σ son recalculados cada vez que se incorpora un nuevo valor simulado del año previo a la serie histórica (Paso 5). El proceso se repite para los siguientes años (2024–2028). La fórmula aplicada para este modelo estocástico dinámico:

$$X_t = \exp(\mu_t + \sigma_t \cdot Z) \text{ donde } \mu_t, \sigma_t = \text{recalculados tras } X_{t-1}.$$

Este procedimiento representa una cadena de simulaciones adaptativas, donde se privilegia la actualización continua de la distribución generadora para reflejar mejor los patrones observados.

10.8.2 Simulación asistida por la función automatizada del módulo integrado

Dentro de la paquetería de Origin Pro hay un módulo de Simulación Monte Carlo integrado. Al igual que en el proceso anterior, se utilizan los parámetros iniciales: μ y σ . Por ello, para el proceso actual se aplica el Paso 1 y 2 de la simulación mediante construcción manual de algoritmo adaptativo.

Paso 3: Simulación del primer año

Comando en Origin: Tools → Monte Carlo Simulation → Llenado de datos de ventana:

Input Variable Name: Arsenico

Distribution: LogNormal

Location (μ): valor del paso 2 (-1.18603)

Scale (σ): valor del paso 2 (0.09376)

Output Variable Name: Año a simular (Concentracion_2023)

Output Expression: Arsenico

Num of Runs: 10000

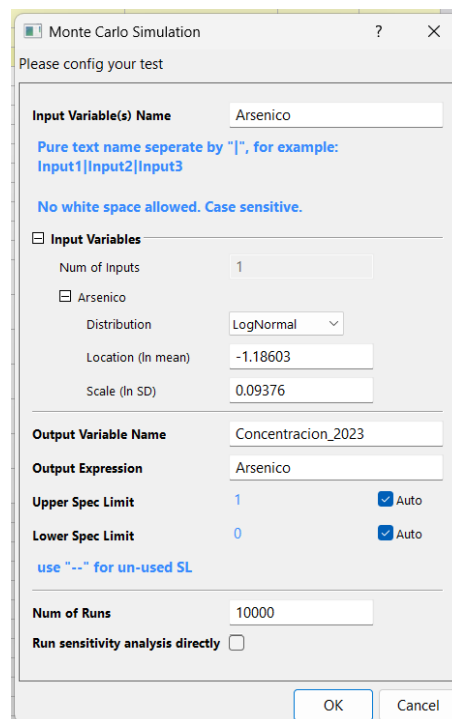


Figura 13. Ventana de Monte Carlo Simulation en Origin.

Paso 4: Interpretación de datos para el primer año

La ejecución del paso anterior da como resultado 4 hojas nuevas con datos de entrada, salida y una gráfica donde el valor de la media será el valor de la concentración de As para 2023, o según el año ejecutado.

Paso 5: Actualización de parámetros de log normal (μ , σ)

- c) Incorporar la media de 2023 al conjunto histórico (datos 2012–2023).
- d) Se recalcula μ_{2023} y σ_{2023} incluyendo ese nuevo dato (igual que en el Paso 2).

Paso 6: Cadena adaptativa con reestimación anual

Se simula el valor de cada año $t+1$ utilizando una distribución log-normal cuyos parámetros μ y σ son recalculados cada vez que se incorpora un nuevo valor simulado del año previo a

la serie histórica (Paso 5). El proceso se repite para los siguientes años (2024–2028). Ejecutando el Paso 3.

11 RESULTADOS

11.1 Descripción general de los datos subterráneos

La Figura 14, señala la cantidad de muestreos subterráneos realizados por año entre 2012 y 2023 permite identificar el comportamiento de los datos recopilados: Incremento significativo en 2013 seguido de una estabilización entre 2014 y 2017. Pico notable en 2018, indicando un aumento considerable en la cantidad de muestras y una disminución constante desde 2019, alcanzando los niveles más bajos en 2023.

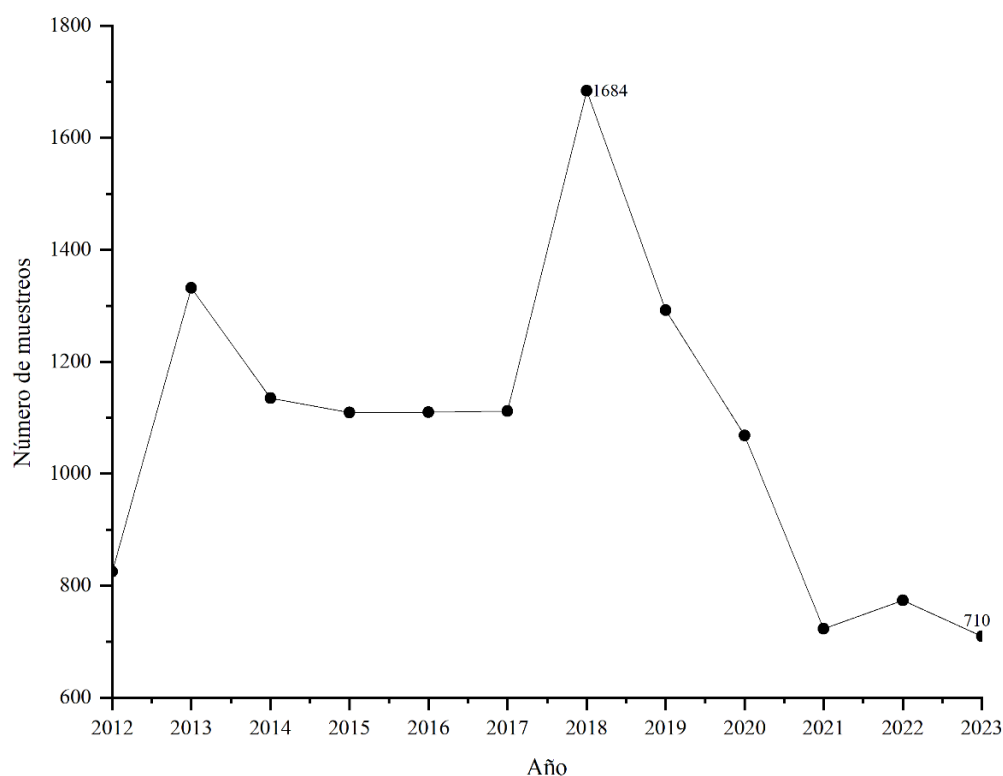


Figura 14. Fluctuaciones del número de muestreos subterráneos por año CONAGUA.

Esta tendencia descendente puede estar relacionada con factores como cambios en la prioridad de monitoreo, reducción de recursos disponibles o restricciones operativas en los últimos años. Situación que contrasta con la magnitud del problema y podría limitar la capacidad para detectar tendencias emergentes. En contextos donde la OMS y la EPA recomiendan monitoreo continuo para metales, especialmente en pozos que ya muestran excedencias históricas o coincidencias temporales prolongadas.

11.2 Análisis por coincidencias temporales

El propósito de este análisis fue identificar sitios de monitoreo de agua subterránea con comportamientos consistentes a lo largo del tiempo.

Con este objetivo, se seleccionaron únicamente los sitios registrados durante seis años o más, criterio que permite trabajar con series temporales para observar patrones persistentes de excedencia, frecuencia de muestreo y comportamiento general de los parámetros evaluados.

Sitios con coincidencias temporales, se identificó un total de 132 sitios presentes durante al menos 6 años de monitoreo distribuidos en 18 estados.

Distribución Geográfica, Durango lidera con la mayor cantidad de sitios críticos, con 48 sitios, seguido por Guanajuato con 18 sitios, Zacatecas con 16 sitios y Coahuila de Zaragoza con 12 sitios. Por otro lado, estados como San Luis Potosí, Puebla, Oaxaca, Ciudad de México, Estado de México y Aguascalientes presentan solo 1 sitio cada uno, reflejando una menor criticidad relativa.

Sitios con incumplimientos constantes, de los 132 sitios analizados, aquellos que superaron los LMP en al menos 6 años mostraron los siguientes parámetros más frecuentemente excedidos:

- As: Excedido en el 64,4% de los sitios.
- Pb: Excedido en el 53.0% de los sitios.
- Cd: Excedido en el 41,7% de los sitios.

Con base en la información obtenida, se generó una representación gráfica que muestra los estados con mayor número de sitios que cumplen con el criterio de presencia mínima durante 6 años, ofreciendo una visualización clara de las áreas donde las excedencias se presentan de manera reiterada.

Este recurso permite comparar la distribución de sitios persistentes entre estados y regiones, así como identificar aquellos lugares que destacan por la frecuencia con que superan los límites normativos establecidos.

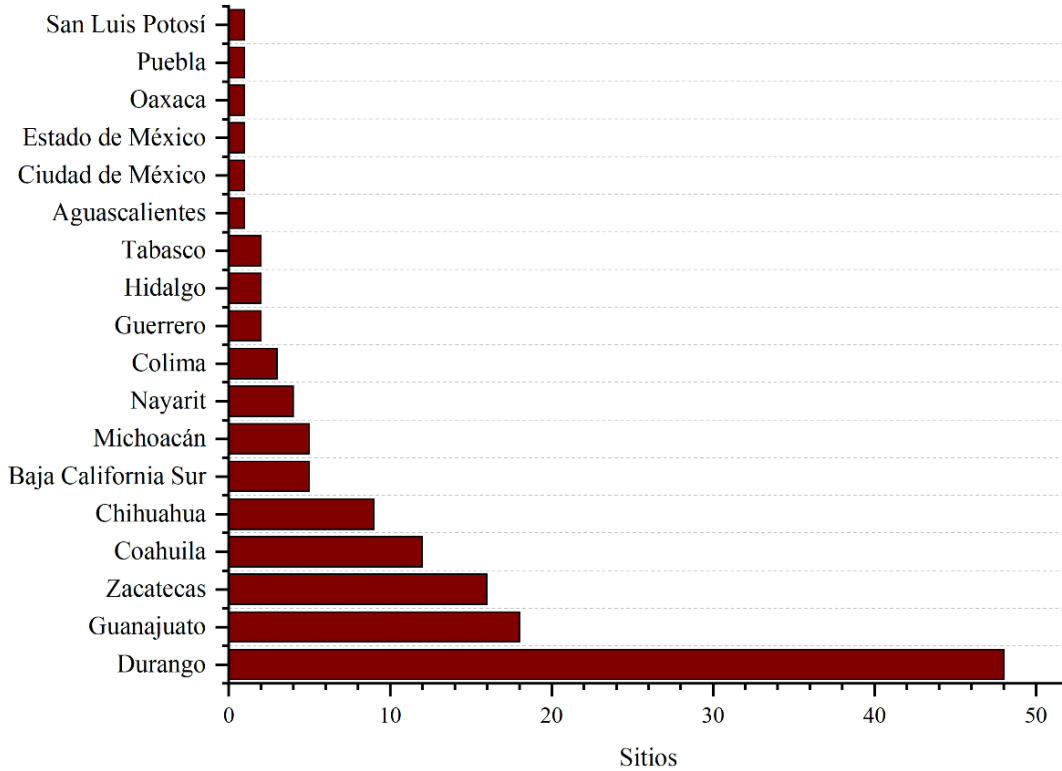


Figura 15. Distribución geográfica de los sitios críticos identificados.

11.3 Evaluación de Sitios Críticos

La Tabla 12, presenta los valores máximos registrados para 11 de los 12 metales pesados en sitios de monitoreo, comparados con los LMP establecidos por la NOM-127-SSA1-2021. Se incluyen el metal, su LMP, el valor máximo registrado y la ubicación específica donde se obtuvo este registro.

Los datos destacan la gravedad de los excedentes, como el As (0.58 mg/L) en Baja California Sur, superando su LMP de 0.025 mg/L, y el Aluminio (2.478 mg/L) en Durango, excediendo su límite de 0.2 mg. /L, o inclusive lugares que son el valor máximo en 2 metales. Esta evaluación permite identificar zonas prioritarias para intervención.

Tabla 12. Valores máximos de metales a nivel nacional.

Metal	LMP (mg/L)	Valor Máximo (mg/L)	Excedencia Relativa (x)	Ubicación	Coordenadas
Aluminio (Al)	0.2	2.478	12.39	Pozo Nicolás Bravo, Durango	25.7456, -103.9011
Arsénico (As)	0.025	0.58	23.2	San Antonio, Baja California Sur	23.8247, -110.0547
Bario (Ba)	1.3	0.5121	0.39	Sapaet Bellota 53, Tabasco	18.0952, - 93.3223
Cadmio (Cd)	0.005	0.0185	3.7	Cerrito de Agua Caliente, Guanajuato	20.6381, -101.5807
Cromo (Cr)	0.05	0.15088	3.02	Pozo Tlaxiaco, Oaxaca	17.2496, - 97.6603
Hierro (Fe)	0.3	14.06	46.87	San Antonio, Baja California Sur	23.8247, -110.0547
Manganeso (Mn)	0.15	4.47335	29.82	Valle de Juárez 3, Chihuahua	31.2720, -105.8813
Mercurio (Hg)	0.006	0.0087	1.45	Laureles (Pozo Cd. del Sol II), Michoacán	20.3746, -102.0340
Níquel (Ni)	0.07	0.0764	1.09	Galón Soberón, Guerrero	16.9005, -99.8281
Plomo (Pb)	0.01	0.27	27	Municipal SJ Tepeteopan, Puebla	18.5212, -97.5492

Fuente: datos tomados de CONAGUA, 2014.

El mapa de la Figura 16, muestra la ubicación geográfica de los pozos identificados en la tabla anterior, donde se han registrado excedencias de los LMP para distintos metales pesados. Esta representación geográfica permite observar la distribución de los sitios críticos en México, facilitando la identificación de áreas prioritarias para la implementación de medidas correctivas.

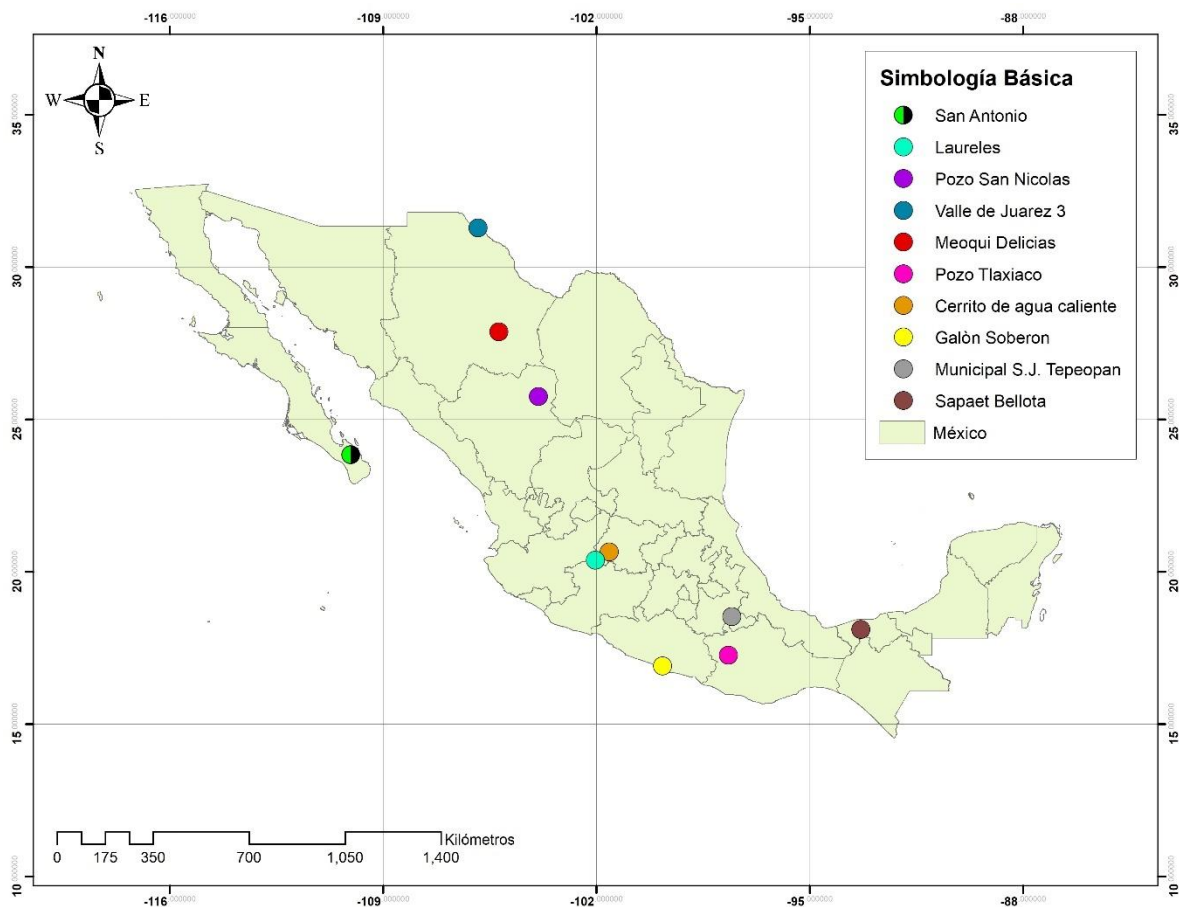


Figura 16. Ubicación geográfica de los pozos con los valores máximos de metales a nivel nacional.

Nota: Círculos divididos: Representan sitios con más de un metal excedido. Fuente: datos tomados de CONAGUA, 2024.

Los patrones nacionales confirman que la problemática de la calidad del agua subterránea en México no se limita al As: las excedencias en Fe, Mn, Pb y Cd revelan un escenario multifactorial donde varios pozos presentan concentraciones entre 20 y 40 veces por encima del LMP de la NOM-127-SSA1-2021, superando también los valores recomendados por la OMS y la EPA para elementos clave como As y Pb (0.01–0.015 mg/L).

11.4 Coincidencia de LMP excedentes a nivel nacional

El sitio San Antonio, ubicado en el Acuífero Los Planes (323), es crítico por la coincidencia de múltiples excedencias en metales pesados, destacándose a nivel nacional por las siguientes razones:

- **Metales excedidos en el sitio:** As 0,58 mg/L - Fe 14,06 mg/L
- **Relevancia Nacional.** Este acuífero se encuentra dentro de los primeros 5 lugares a nivel nacional en los niveles máximos registrados para: Cd, Cr y Pb.

Esto refuerza su importancia como una región prioritaria para intervención, debido a la acumulación de riesgos por múltiples contaminantes.

La combinación de estos factores resalta la vulnerabilidad del Acuífero Los Planes, convirtiéndolo en un punto focal para:

1. Monitoreo Continuo: Evaluar las tendencias de contaminación.
2. Implementación de Medidas Correctivas: Reducir la exposición a metales pesados para las comunidades dependientes de este recurso hídrico.

11.5 Acuífero Los Planes 323

Área de estudio

El Acuífero *Los Planes 323* determinado por CONAGUA, se localiza en el suroriente de Baja California Sur, dentro del municipio de La Paz, a incluir 1,013 km² entre los paralelos 23°39'56" y 24°13'01" N, y los meridianos 109 °50'49" y 110°07'54" O. Limita al noroeste con los acuíferos La Paz y El Coyote, al este y sureste con San Bartolo, al sur con San Bartolo y Cañada Honda, al suroeste con El Carrizal, al oeste con La Paz, y al norte con el Golfo de California.

Tipo de acuífero

De acuerdo con CONAGUA (2024) el Acuífero Los Planes es principalmente libre, aunque en ciertas áreas presenta condiciones de semi confinamiento debido a la presencia de capas de sedimentos arcillosos en niveles profundos, lo que lo convierte en un sistema heterogéneo y anisotrópico.

La parte superior está compuesta por materiales granulares como depósitos clásticos de diversas granulometrías, conglomerados, y sedimentos de origen lacustre y eólico. En las capas más profundas predominan las rocas sedimentarias con permeabilidad secundaria provocada por fracturas. Las rocas intrusivas, visibles en el noroeste, junto con las formaciones metamórficas de filitas, esquistos y gneises, que afloran al sur, este y oeste, constituyen el basamento y los límites del flujo subterráneo.

El movimiento del agua subterránea en las capas granulares depende de la permeabilidad de los diferentes depósitos, mientras que en las rocas fracturadas está determinado por los patrones de fracturas y fallas, así como por la configuración de los bajos estructurales en el subsuelo.

Clima

El clima del Acuífero Los Planes es desértico (BW), de acuerdo con la clasificación de Köppen (1964), caracterizado por condiciones muy áridas debido a la escasa precipitación y alta evaporación. Predomina el tipo BW(h')w, muy árido y cálido, con temperaturas anuales mayores a 22°C y lluvias concentradas en verano, representando solo el 5% al 10.2% del total anual en invierno. En las zonas más elevadas, el clima varía a BWhw (muy árido, semicálido) y BSohw (árido, semicálido), con temperaturas anuales entre 18°C y 22°C.

La región enfrenta prolongadas sequías, interrumpidas ocasionalmente por tormentas tropicales y huracanes, que contribuyen significativamente a la recarga del acuífero. Sin embargo, las sequías extremas reducen los escurrimientos superficiales y el almacenamiento del agua subterránea, agravando las condiciones de aridez (SEMARNAT, 2018).

Hidrología

La red hidrográfica de la cuenca de San Juan de los Planes está compuesta por un drenaje denso e intermitente. En las zonas altas, sigue patrones dendríticos y rectangulares, mientras que, en las bajas, predomina un drenaje paralelo dicotómico. Las corrientes, al llegar a la planicie, se infiltran, aportando agua al acuífero. La cuenca, alargada de norte a sur con 10 km de longitud, está rodeada por la Bahía La Ventana al norte, las sierras La Salecita y San Antonio al sur, Las Cruces y La Trinchera al oeste, y la sierra La Gata al este. Las corrientes principales, generadas por lluvias ciclónicas y convectivas, incluyen los arroyos Agua Caliente y El Chavaló, que se unen aguas abajo para formar el Agua Caliente (UABC, 2018).

Geomorfología

La geomorfología del acuífero Los Planes, de acuerdo con Martínez-Gutiérrez y Sethi (1997) y Gastil et al. (1981), es el resultado de diversos procesos geológicos, como la formación de montañas intrusivas, actividad volcánica, sedimentación y una depresión transpeninsular generada por una falla tectónica con orientación NW-SE. Estos procesos han dado lugar a tres unidades geomorfológicas principales:

1. El valle, ubicado en la zona más baja.
2. Las sierras, formadas por rocas ígneas intrusivas y metamórficas, entre las que destacan Las Cruces y La Trinchera al oeste, y La Gata al este.
3. Los taludes, que actúan como zonas de transición entre las sierras y el valle.

Adicionalmente, en la región oriental, cercana a la línea costera, se encuentran lomeríos erosionados formados por sedimentos de origen marino. Estos elementos reflejan la complejidad geológica y geomorfológica de la zona, destacando su relevancia tanto desde el punto de vista estructural como hidrogeológico.

Geología

La región del sur de la Península de Baja California presenta unidades litológicas que abarcan desde el Triásico Superior Inferior hasta el Holoceno, con las principales sierras compuestas por rocas ígneas intrusivas y metamórficas. De acuerdo con Gastil et al., 1981; Blake et al., 1984, el marco geológico regional incluye dos cinturones tectonoestratigráficos:

- Corteza oceánica, visible en las islas de las porciones occidental y noroccidental.
- Afinidad sedimentaria, vulcano sedimentaria y volcánica, presente en la península y las islas orientales.

En el área del acuífero existe un complejo metamórfico asociado con la falla La Paz, compuesto por pizarras, filitas, esquistos y sillimanita. Sobre esta secuencia se encuentran rocas intrusivas de composición gabroica, granítica y granodiorítica. Finalmente, la columna estratigráfica está cubierta por sedimentos aluviales derivados de la erosión de las rocas más antiguas. Esta descripción se basa en las Cartas Geológico-Mineras San Antonio F12-B13 y San Juan de los Planes F12-B14 (escala 1:50,000, SGM 1996 y 2000).

Hidrogeoquímica y calidad del agua

Entre 2013 y 2020, la Dirección Local Baja California Sur y la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA) realizaron el análisis de 44 muestras de agua subterránea en distintos periodos: 12 muestras entre 2013-2018, 22 muestras en 2018 y 10 muestras en 2020. Estas muestras provinieron de pozos para uso público, urbano y agrícola distribuidos en la zona de explotación (RENAMECA, 2018-2020). Los parámetros analizados fueron fisicoquímicas (temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, nitratos, sulfatos), bacteriológicas (coliformes fecales y totales) y de metales pesados As, Fe, Mn, Cd y Pb.

Concentraciones excedentes

Algunos parámetros exceden los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021:

Tabla 13. Concentraciones excedentes de los LMP de acuerdo con las NOM-127-SSA1-2021.

Parámetros	LMP (mg/L)	Valor máximo (mg/L)	Excedencia relativa (x)
Coliformes fecales	Ausencia	3873 NMP/100 ml	Excede
Sólidos disueltos totales (SDT)	1000	4200	4.2
Sulfatos	400	694	1.7
Hierro	0.3	14.06	46.9
Manganeso	0.15	1.16	7.7
Arsénico	0.025	0.42	16.8

Fuente: datos tomados de RENAMECA 2018-2020.

Conductividad eléctrica (CE)

La CE oscila entre 430 y 6550 $\mu\text{S}/\text{cm}$, clasificando el agua como dulce a marina, según la APHA (1995). Las mayores concentraciones se encuentran en zonas costeras y de bombeo intensivo, donde se mezcla con agua salina de niveles profundos.

Familias de agua

Las características hidroquímicas del agua permiten clasificarla en diferentes familias según los iones predominantes. Estas familias reflejan los procesos geológicos y las influencias externas, que afectan la calidad del agua subterránea. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024), las principales familias identificadas son:

1. Sódico-clorurada y clorurada-mixta.
2. Bicarbonatada-mixta, sulfatada-cálcica y sulfatada-mixta.

Análisis de los grupos hidrogeoquímicos

El análisis hidrogeoquímico del acuífero Los planes permite identificar distintas composiciones químicas del agua subterránea, organizadas en grupos que reflejan las interacciones entre los procesos geológicos, geoquímicos y la dinámica del flujo subterráneo. Estos grupos son el resultado de factores como la recarga natural desde las sierras, la influencia de la intrusión marina, reacciones de intercambio iónico, y la interacción con rocas y sedimentos en diferentes zonas del acuífero.

Cada grupo presenta características específicas que responden a las condiciones locales, como salinidad, concentración de iones mayoritarios, y presencia de contaminantes asociados a procesos naturales o actividades humanas. Esta clasificación ayuda a comprender la variabilidad espacial de la calidad del agua subterránea y su relación con el funcionamiento

hidrodinámico del acuífero, lo que es clave para su manejo sostenible y la identificación de posibles riesgos.

Tabla 14. Grupos Hidrogeoquímicos del acuífero Los Planes.

Grupo	Características principales	Ubicación
1	Agua de menor salinidad (promedio 400 mg/l), con recarga de escurrimientos de las sierras Trinchera y San Antonio.	Porción centro-sur del acuífero.
2	Agua con mayor salinidad, alta concentración de cloruros y sodio debido a intrusión marina, que desplaza agua subterránea de menor densidad y salinidad.	Línea costera.
3	Salinidad moderada (promedio 1250 mg/l), con altos niveles de sulfatos, As y metales pesados, derivados de interacción con rocas graníticas y yacimientos metálicos.	Sierra de San Antonio (porción sur del área de estudio).
4	Reacciones de intercambio catiónico directo: el sodio de la fracción arcillosa es reemplazado por calcio, alterando pH y alcalinidad.	Zonas de recarga con infiltración de agua dulce.
5	Agua influenciada por intrusión marina, con reacciones de intercambio catiónico inverso: el calcio de la fracción arcillosa es reemplazado por sodio del agua salobre.	Zonas con mezcla de agua marina y subterránea (influencia costera).

Fuente: Monitoreos RENAMECA 2018-2020.

Intrusión marina y contaminación por As

La intrusión marina en el Acuífero Los Planes representa un desafío ya que avanza hasta 7 km tierra adentro, mezclándose con agua subterránea de menor salinidad y generando reacciones químicas características de los acuíferos costeros, como el intercambio catiónico inverso. Este proceso altera la composición química del agua, aumentando su salinidad y favoreciendo la intrusión marina. La cuña de agua marina, que marca el límite del avance salino, se encuentra aproximadamente a 12 km de la costa, lo que indica una importante influencia marina en el sistema (CONAGUA, 2024).

Además, se han identificado elevadas concentraciones de As en la porción occidental del acuífero, superando los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 para agua de consumo humano (REMECA, 2024., CONAGUA 2024). Este contaminante está asociado a la Falla El Sargento, una estructura geológica que cruza el acuífero desde la Sierra de San Antonio en el sur hasta la Bahía de La Ventana en el norte. La falla actúa como una vía de transporte y movilización de elementos químicos, incluyendo As, que posiblemente proviene de interacciones geoquímicas con minerales presentes en el subsuelo (Gastil et al. 1981).La

combinación de la intrusión marina y la contaminación por As evidencia la vulnerabilidad del acuífero tanto a procesos naturales como a posibles impactos de actividades humanas.

Disponibilidad de agua subterránea en el acuífero

La Disponibilidad Media Anual (DMA) de agua subterránea se calcula utilizando la fórmula de la NOM-011.CONAGUA-2015:

$$\mathbf{DMA = R - DNC - VEAS}$$

Donde:

Cálculo:

R: Recarga total media anual

$$\mathbf{DMA = 10.8 - 0.2 - 12.937570}$$

DNC: Descarga natural comprometida

$$\mathbf{DMA = -2.337570 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

VEAS: Volumen de extracción de aguas subterráneas

El acuífero presenta un déficit de 2.337570 hm³/año, lo que indica sobreexplotación y la imposibilidad de otorgar nuevas concesiones de agua subterránea (CONAGUA, 2024).

11.6 Identificación de pozos con As persistente

A continuación, se presenta la Figura 17 que muestra el número de sitios de muestreo en cada estado, donde las concentraciones constantes de As superan el LMP (0.025 mg/L) de la NOM en al menos seis de los once años evaluados (2012–2022).

Destaca el estado de Durango con 48 pozos afectados, casi tres veces más que el siguiente estado evidencia una severidad sostenida en la región. Le sigue Zacatecas (16), Coahuila (12), Guanajuato (12) y Chihuahua (8), este patrón sugiere un corredor central-norte con una elevada incidencia conformando un grupo de estados con presencia moderada-alta.

Por su parte, Baja California Sur registra 5 pozos persistentes, mientras que Michoacán e Hidalgo aportan cada uno 2 pozos. Finalmente, Nayarit, Aguascalientes y San Luis Potosí muestran apenas 1 pozo cada uno, indicando una limitada extensión de la problemática en estas entidades.

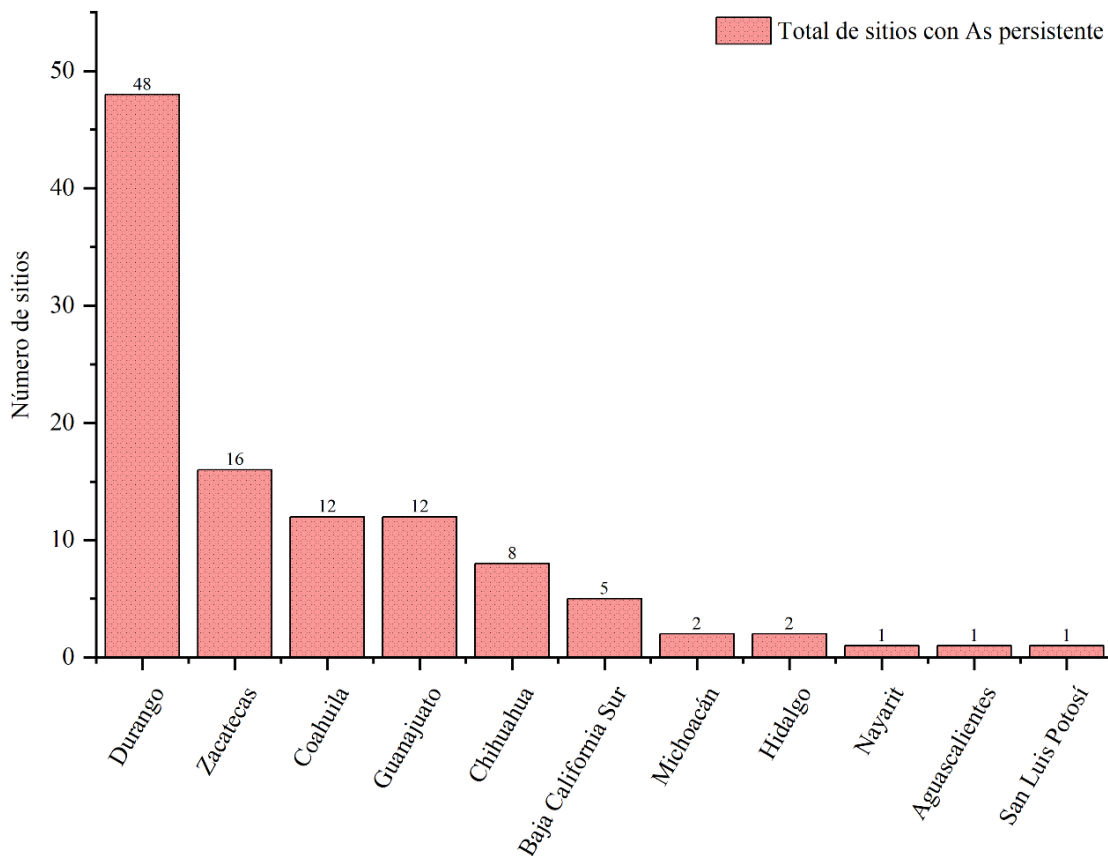


Figura 17. Distribución estatal de sitios con presencia persistente de As (≥ 6 años).

En relación con la figura anterior, podemos observar en la Tabla 15 la lista de los estados con sus respectivos sitios de monitoreo y los acuíferos en los que se encuentran ubicados.

Durango se mantiene en el primer lugar con el mayor número de 14 acuíferos afectados a los que corresponden a los 48 pozos con As persistente, evidenciando una problemática extendida en todo el estado. En segundo lugar, le sigue Zacatecas, con 16 pozos distribuidos en 11 acuíferos; Coahuila, con 12 pozos en 5 acuíferos; Guanajuato, con 12 pozos en 6 acuíferos y Chihuahua, con 8 pozos en 7 acuíferos. Estos estados identificados en el corredor central-norte muestran una incidencia moderada pero repartida entre diversas unidades hidrogeológicas.

En contraste, Baja California Sur concentra sus 5 pozos en un único acuífero, lo que sugiere que las intervenciones podrían focalizarse eficazmente. Mientras que Michoacán presenta 2 pozos distribuidos en 2 acuíferos; Hidalgo, 2 pozos en un mismo acuífero, y Nayarit,

Aguascalientes y San Luis Potosí con un solo pozo cada uno en su respectivo acuífero, casos de menor alcance.

Estos hallazgos sugieren que las estrategias de monitoreo y mitigación deben adaptarse al grado de dispersión en cada estado: cuando múltiples acuíferos resultan afectados, se puede implementar programas de vigilancia amplios y coordinados; por el contrario, en regiones más localizadas, medidas puntuales pueden resultar más eficientes.

Tabla 15. Pozos con presencia de As persistente.

Estado	Acuífero	Pozos con As persistente (≥6 años)
Durango	Tepehuanes-Santiago	Pozo Valle Dorado
		Pozo El Tagarete
		Pozo La Huerta
		Pozo La Estancia
		Pozo 2 Los Herrera
		Pozo Presidios
		Pozo Heberto Castillo
	Pedriceña-Velardeña	Pozo 2 Pedriceña
		Pozo 1 Pedriceña
		Pozo 2 Velardeña
		Pozo Vista Hermosa
		Pozo 2 Cuencamé
		Pozo 4 Cuencamé
		Pozo 1 Cuencamé
	Peñón Blanco	Pozo Cerro De Santiago
		Pozo J. Agustín Castro
		Pozo Luis Moya
		Pozo Yerbanis
		Pozo 3 Peñón Blanco
	Valle del Guadiana	Pozo Covadonga
		Pozo Lázaro Cárdenas
		Pozo Dieciséis De Septiembre
		Pozo Col. 20 De Nov.
		Pozo Col. El Ciprés
	Matalotes-El Oro	Pozo Col. Hidalgo
		Pozo Baylon
		Pozo Las Drogas
		Pozo Puerto Pinto
		Pozo San Bernardo
	Principal-Región Lagunera	Pozo 5 De Julio
Pozo La Torreña (Pozo Transporte)		

Estado	Acuífero	Pozos con As persistente (≥6 años)	
		Pozo 14 San Ignacio (SIDEAPA)	
		Pozo 32 Pancho Villa (SIDEAPA)	
		Pozo Cna 4840	
		Pozo Bella Unión	
		Valle de Canatlán	Pozo Nicolas Bravo
			Pozo Bruno Martínez
			Pozo Canatlán
		Valle de Santiaguillo	Pozo Fuente del Llano
			Pozo Nuevo Ideal I
		San Juan del Río	Pozo Toledo
			Pozo Nogales
		Oriente Aguanaval	Pozo 7 Libres Picardías
			Pozo 1 La Esperanza
		Santa Clara	Pozo 2 Ignacio López Rayón
		Buenos Aires	Pozo Las Delicias
San Fermín	Pozo San Fermín		
Nazas	Pozo Rodeo		
Zacatecas	Ojocaliente	Esteban S. Castorena	
		Ojocaliente	
		Luis Moya	
		El Palmar	El Fuerte
			General Francisco R Murguía
		Jalpa-Juchipila	Los Arellano
			La Mezquitera
		Benito Juárez	Pozo 2 Agua Potable Sistema Benito Juárez
			Pozo 524 agua potable Rancho Nuevo (Sustituto Pozo 669 Rancho Nuevo)
		El Salvador	El Salvador 2 (El Salvador Sal8)
		Camacho	Camacho 1 (San Marcos)
		Guadalupe de las Corrientes	Estancia La Colorada
		Calera	Francisco I Madero
		La Blanca	Gral. Pánfilo Natera
		Loreto	Maravillas
Guadalupe Garzarón	Concepción del Oro		
Coahuila	Principal-Región Lagunera	Pozo 369 Albia	
		Pozo Nuevo San Isidro	
		Pozo Alamito	
		Pozo 529 Gatho	
		Pozo El Cariño	
		Pozo Gilita 2	

Estado	Acuífero	Pozos con As persistente (≥6 años)
		Pozo San Pablo
		Pozo 4074 (Bomba 50 Simas)
	Paredón	Paredón 2 - Ejido Cosme
	La Paila	Pozo La Candelaria
	Región Manzanera-Zapalinamé	Pozo San Antonio de las Alazanas
	Laguna Del Rey-Sierra Mojada	Pozo Salinas del Rey Sur
Guanajuato	Laguna Seca	Pozo Blanco 2
		Rancho de Guadalupe 2
		Rancho de Guadalupe 1
		Estación de Lourdes - San Luis de la Paz
	Pénjamo-Abasolo	18 De Marzo
		Bordo Blanco 2
		Cerrito de Agua Caliente
	Silao-Romita	Pozo 28
		Guadalupe Paso Blanco
	Cuenca Alta del Rio Laja	Comunidad San José de la Estacada
	La Muralla	Comunidad Jaguey de los Serranos
	Rio Turbio	Ejido Dotación Puerta de Llave
Chihuahua	Buenaventura	Buenaventura 3
	Palomas-Guadalupe Victoria	Palomas-Guadalupe Victoria 1
	Meoqui-Delicias	Meoqui-Delicias 3
		Meoqui-Delicias 2
	Jiménez-Camargo	Jiménez-Camargo 1
	Tabalaopa-Aldama	Tabalaopa-Aldama 4
	Aldama-San Diego	San Diego de Alcalá
	Laguna de Palomas	Laguna de Palomas 2
Baja California Sur	Los Planes	San Antonio
		Juan Domínguez Cota
		Tiro Santa Cruz
		El Sargento
		Pozo Clave 91
Michoacán	Morelia-Queréndaro	Pozo San Agustín del Pulque
	La Piedad	Laureles (Pozo Cd. Del Sol II)
Nayarit	Valle Acaponeta-Cañas	Pozo Acaponeta (Sistema Tecuala-Novillero)
Hidalgo	Zimapán	Pozo Zimapán 1
		Pozo Zimapán 2
Aguascalientes	Valle de Aguascalientes	Pozo Cosío
San Luis Potosí	El Barril	El Salitral

11.7 Identificación de acuíferos sobreexplotados con presencia de As persistente

La relación entre el número total de pozos con As persistente (≥ 6 años) se puede observar en la Figura 18 con el subconjunto de esos mismos pozos que se encuentran dentro de acuíferos catalogados como sobreexplotados por CONAGUA.

Al usar este criterio, se observa que Baja California Sur, Aguascalientes y San Luis Potosí tienen una coincidencia total (100 %), lo que significa que todos los pozos con As persistente en estas entidades se localizan en acuíferos sobreexplotados. Coahuila y Guanajuato a la par en segundo lugar de coincidencia con un 92 % respectivamente, y le sigue Chihuahua, con un 63 %. Esta secuencia muestra la fuerte asociación entre la sobreexplotación y la contaminación persistente en el norte y centro del país.

Para Zacatecas se registra un 50 %, mientras que Durango, pese que a tener el mayor número de pozos persistentes muestra una coincidencia menor con el 35%, lo que sugiere que el problema de As en sus pozos proviene principalmente por factores geológicos y no exclusivamente por la extracción intensiva de sus acuíferos. En Michoacán, Hidalgo y Nayarit los pozos no se encuentran ubicados en acuíferos sobreexplotados, lo que sugiere que en esos pozos la persistencia de As podría deberse principalmente a las características intrínsecas de cada acuífero o a fuentes puntuales de contaminación.

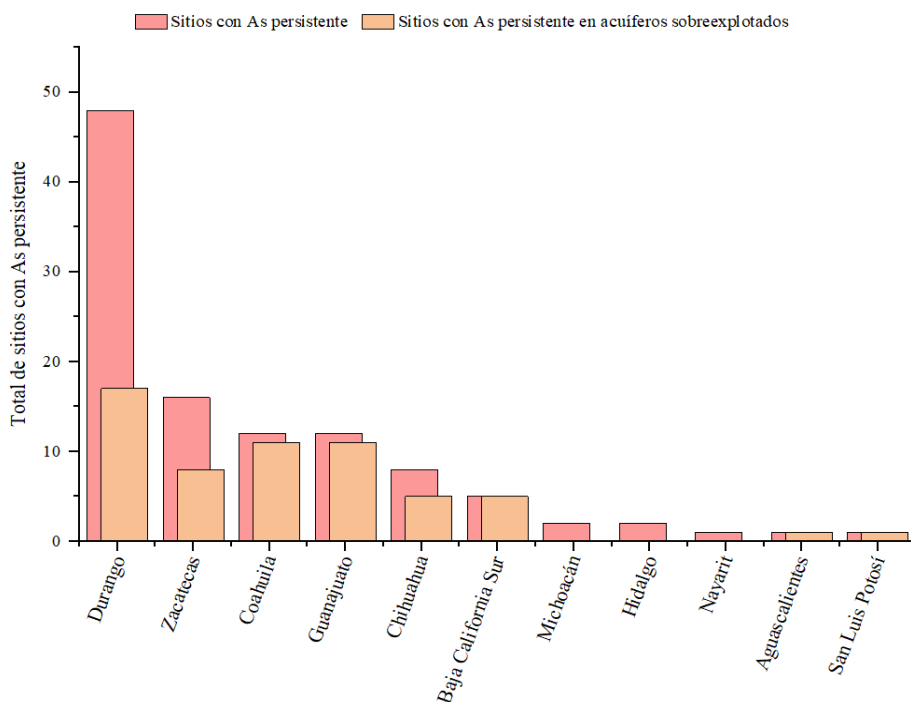


Figura 18. Comparación entre sitios con As persistente y su localización en acuíferos sobreexplotados por estado (2012–2022).

La Tabla 16 complementa la información cuantitativa de la Figura 15 se especifica para cada estado, los acuíferos sobreexplotados incluyendo su clave y nombre. Así, se identifican con claridad las unidades bajo estrés hídrico en Durango, Guanajuato, Coahuila, Zacatecas y Chihuahua, así como las intervenciones puntuales en Baja California Sur, Aguascalientes y San Luis Potosí.

Tabla 16. Acuíferos sobreexplotados con As persistente en pozos por estado (2012–2022).

Estado	Clave de acuífero	Acuífero sobreexplotado	Total, sitios con As persistente (≥6 años) dentro de acuíferos sobreexplotados
Durango	1001	Valle de Santiaguillo	17
	1002	Valle de Canatlán	
	1003	Valle del Guadiana	
	523	Principal-Región Lagunera	
	1024	Oriente Aguanaval	
Guanajuato	1104	Laguna Seca	11
	1108	Cuenca Alta	
	1110	Silao-Romita	
	1114	Rio Turbio	
	1120	Pénjamo-Abasolo	
Coahuila	523	Principal-Región Lagunera	11
	511	Región Manzanera-Zapalinamé	
	508	Paredón	
	509	La Paila	
Zacatecas	3225	Calera	8
	3210	Benito Juárez	
	3212	Ojocaliente	
	3228	La Blanca	
	3229	Loreto	
Chihuahua	804	Buenaventura	5
	812	Palomas-Guadalupe Victoria	
	831	Meoqui-Delicias	
	848	Laguna de Palomas	
Baja California Sur	323	Los Planes	5
Aguascalientes	101	Valle de Aguascalientes	1
San Luis Potosí	2402	El Barril	1

El análisis conjunto de los apartados anteriores y el mapa de distribución nacional de fuentes de presión sobre pozos con As persistente (Figura 19) permite visualizar de manera integral

cómo los acuíferos sobreexplotados, los sitios de disposición final de RSU, las zonas mineras y metropolitanas convergen espacialmente con los pozos donde el As se mantiene por encima del LMP normativo en al menos 6 de los 11 años de monitoreo.

Al observar la superposición de estas fuentes de presión antrópica se refuerza el patrón del corredor centro-norte del país, donde coinciden la mayor cantidad de pozos contaminados por estado y múltiples fuentes de presión. En contraste, las entidades como Michoacán, Hidalgo y Nayarit donde la persistencia de As se presenta en áreas con menos solapamiento.

Es por ello por lo que, debido a la representatividad numérica de pozos contaminados por estado, en los apartados siguientes se detallan con mayor profundidad los 4 estados que conforman el corredor centro-norte del país.

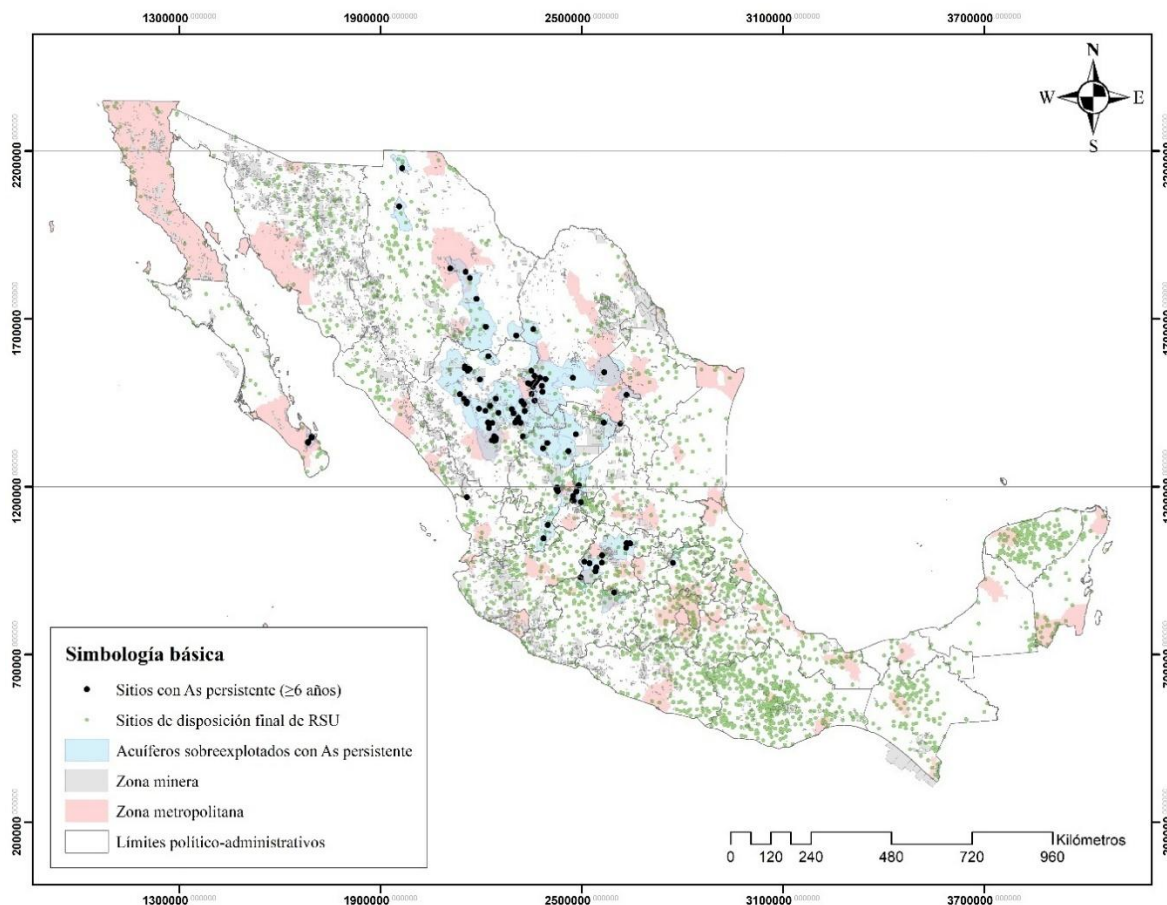


Figura 19. Distribución nacional de fuentes de presión sobre pozos con As persistente.

11.8 Comportamiento estatal de la concentración anual promedio de arsénico

En este subcapítulo se analizan los valores del comportamiento anual de la concentración promedio de As en los cuatro estados con mayor incidencia de pozos con contaminación persistente: Durango, Guanajuato, Coahuila y Zacatecas, durante el periodo 2012–2022. Cada gráfica contrapone la concentración media anual con el LMP (0.025 mg/L) normativo, permitiendo identificar los patrones principales observados en cada entidad.

Durango

En Durango, el valor máximo de la concentración promedio de As se registró al inicio del periodo en 2012 con 0.107 mg/L, y descendió de manera gradual hasta alcanzar el valor mínimo de concentración en 2015 con 0.06 mg/L. A partir de ese año, las concentraciones oscilan moderadamente entre 0.072 y 0.089 mg/L, con un leve repunte en 2019 con 0.093 mg/L.

Aunque la disminución observada al inicio del periodo sugiere cierta disminución de cargas contaminantes, el mantenimiento de valores muy por encima del LMP evidencia el riesgo crónico.

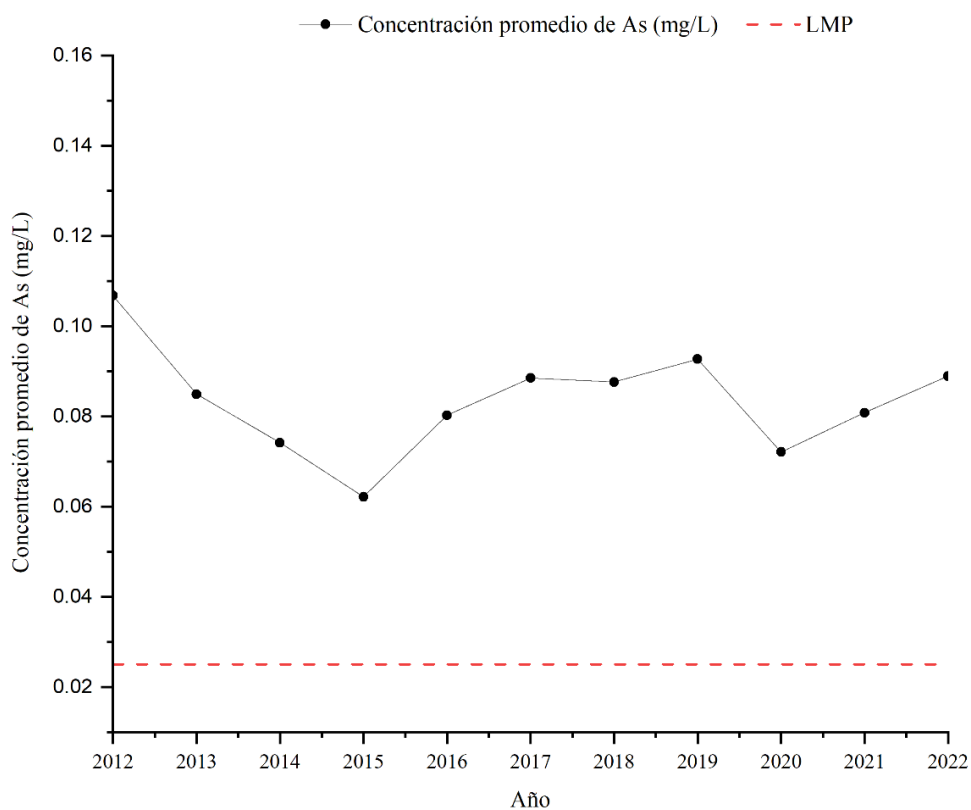


Figura 20. Comportamiento anual de la concentración promedio de As en pozos de Durango.

Zacatecas

En Zacatecas, la concentración promedio anual de arsénico se mantuvo relativamente estable alrededor de 0.085–0.111 mg/L desde 2012 hasta 2020. Posteriormente, se observó una disminución en 2021 con 0.078 mg/L, correspondiente al valor mínimo del periodo, mientras que en 2022 se registró el valor máximo con 0.151 mg/L. Este valor sugiere cambios en las actividades extractivas o en la gestión del recurso que reavivaron la liberación de As en el último año estudiado, manteniendo la condición de riesgo crónico.

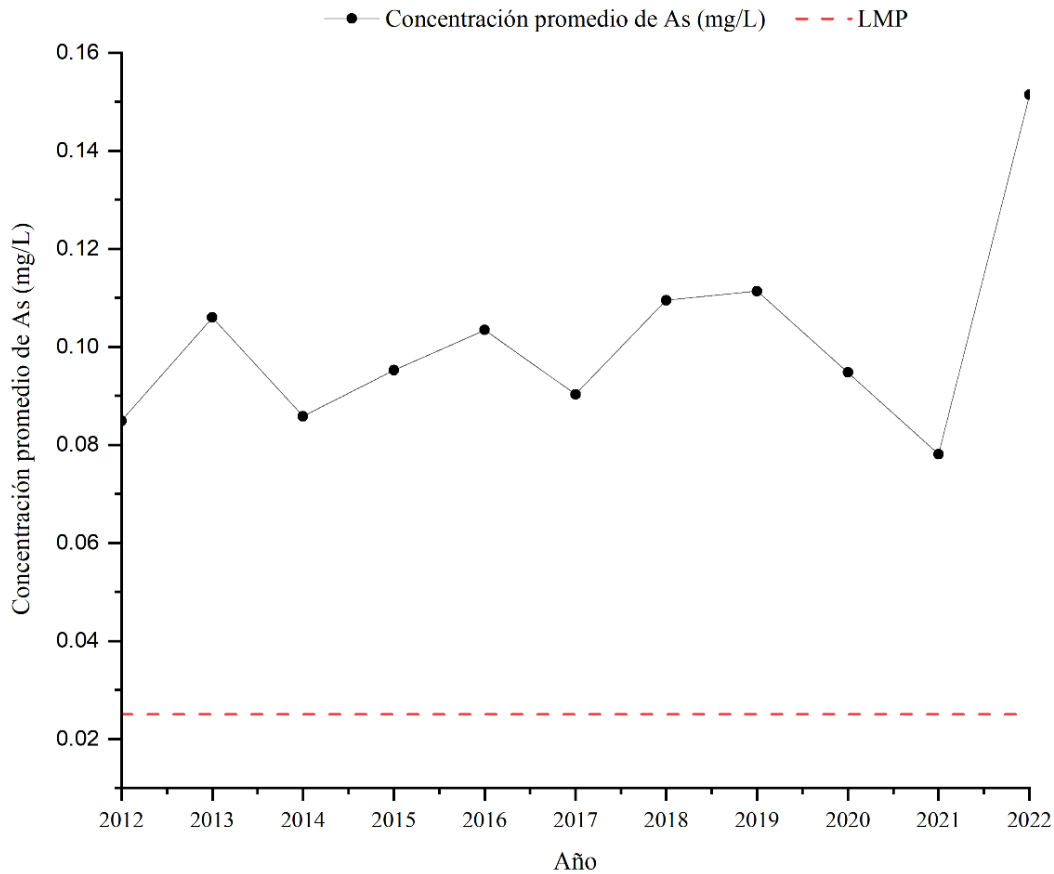


Figura 21. Comportamiento anual de la concentración promedio de As en pozos de Zacatecas.

Coahuila

En Coahuila, los valores promedio anuales de As presentan gran variabilidad: parten de 0.083 mg/L en 2012, alcanzan un primer pico de 0.113 mg/L en 2015, descienden a 0.068 mg/L en 2017, y luego escalan nuevamente hasta 0.124 mg/L en 2018, caen hasta llegar a 0.056 mg/L en 2021 siendo el valor mínimo de la concentración promedio de As del periodo, y al siguiente año se presenta su contraparte con el valor máximo con 0.151 mg/L. Esta oscilación

refleja la heterogeneidad hidrogeológica de sus acuíferos y posibles episodios puntuales de sobreexplotación o aportes contaminantes.

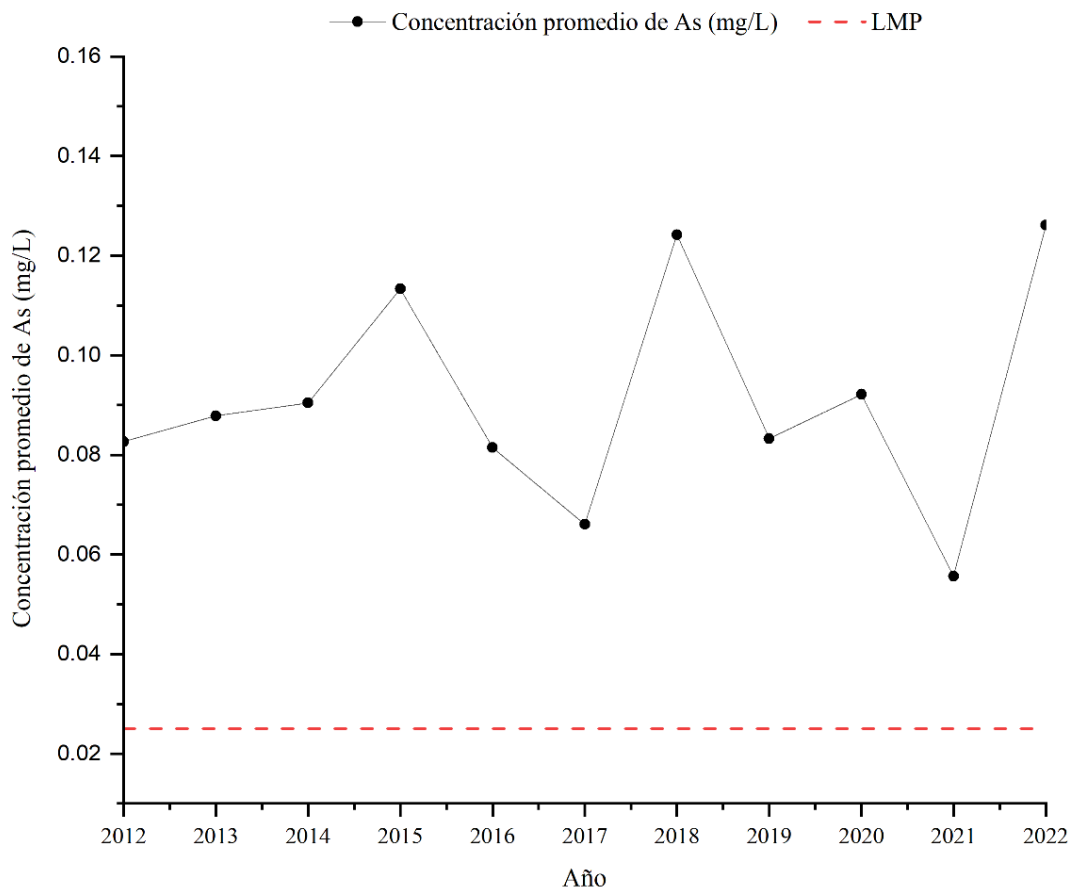


Figura 22. Comportamiento anual de la concentración promedio de As en pozos de Coahuila.

Guanajuato

En Guanajuato, el valor máximo de la concentración promedio de As se registró al inicio del periodo en 2012 con 0.146 mg/L, y descendió de manera gradual hasta alcanzar el valor mínimo de concentración en 2016 con 0.088 mg/L. Entre 2017 y 2022 las concentraciones oscilan entre los 0.113–0.129 mg/L, con un leve repunte de 0.133 mg/L en 2020.

Esta dinámica indica que, tras un periodo de descenso inicial, las presiones de extracción y contaminación volvieron a incrementar la carga de As, manteniéndola por encima del LMP de forma crónica.

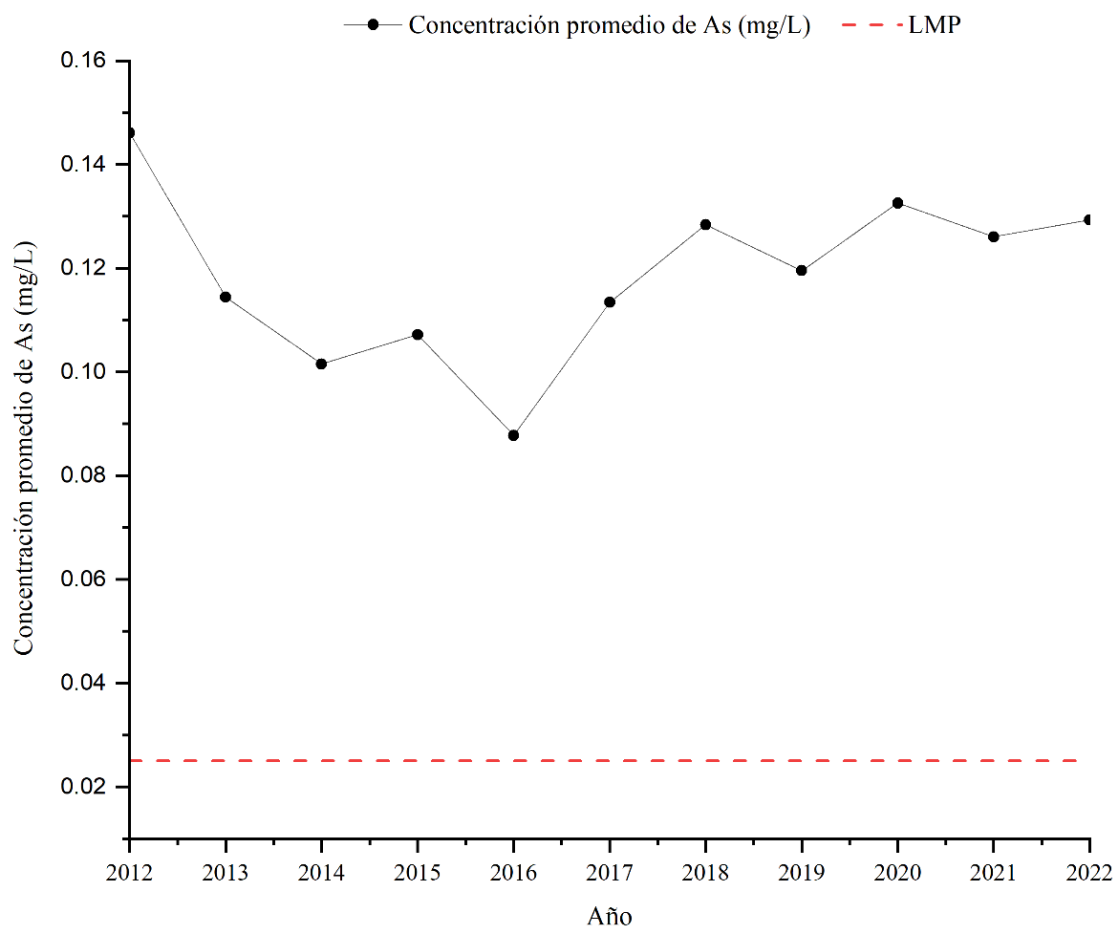


Figura 23. Comportamiento anual de la concentración promedio de As en pozos de Guanajuato.

11.8.1 Comparación del comportamiento anual de la concentración promedio de As en los pozos del corredor centro-norte

En conjunto, se observa que las entidades mantienen concentraciones promedio anuales por encima de la norma durante todo el periodo, con diferencias en su comportamiento y variabilidad entre estados. Todos los estados coinciden en la presencia de un pico alto en 2022, lo que sugiere un factor regional en el corredor centro-norte que agudizó la concentración de As en sus acuíferos al final del periodo.

Por otra parte, los valores promedio más altos sostenidos durante el periodo corresponden a Guanajuato. El valor máximo promedio (0.151 mg/L) pertenece a Zacatecas en 2022 y en contraste, Coahuila que registra el valor mínimo promedio (0.06 mg/L) en 2021.

Asimismo, se observan comportamientos diferenciados entre estados:

- Coahuila y Zacatecas alcanzan sus valores máximos y mínimos justamente en los dos últimos años del periodo: pasan de un mínimo en 2021 a su mayor concentración en 2022.
- Durango y Guanajuato coinciden con su valor máximo al inicio del periodo en 2012 y alcanzan su concentración mínima en 2016 y 2015 respectivamente, para luego estabilizarse por encima de 0.08 mg/L anual.

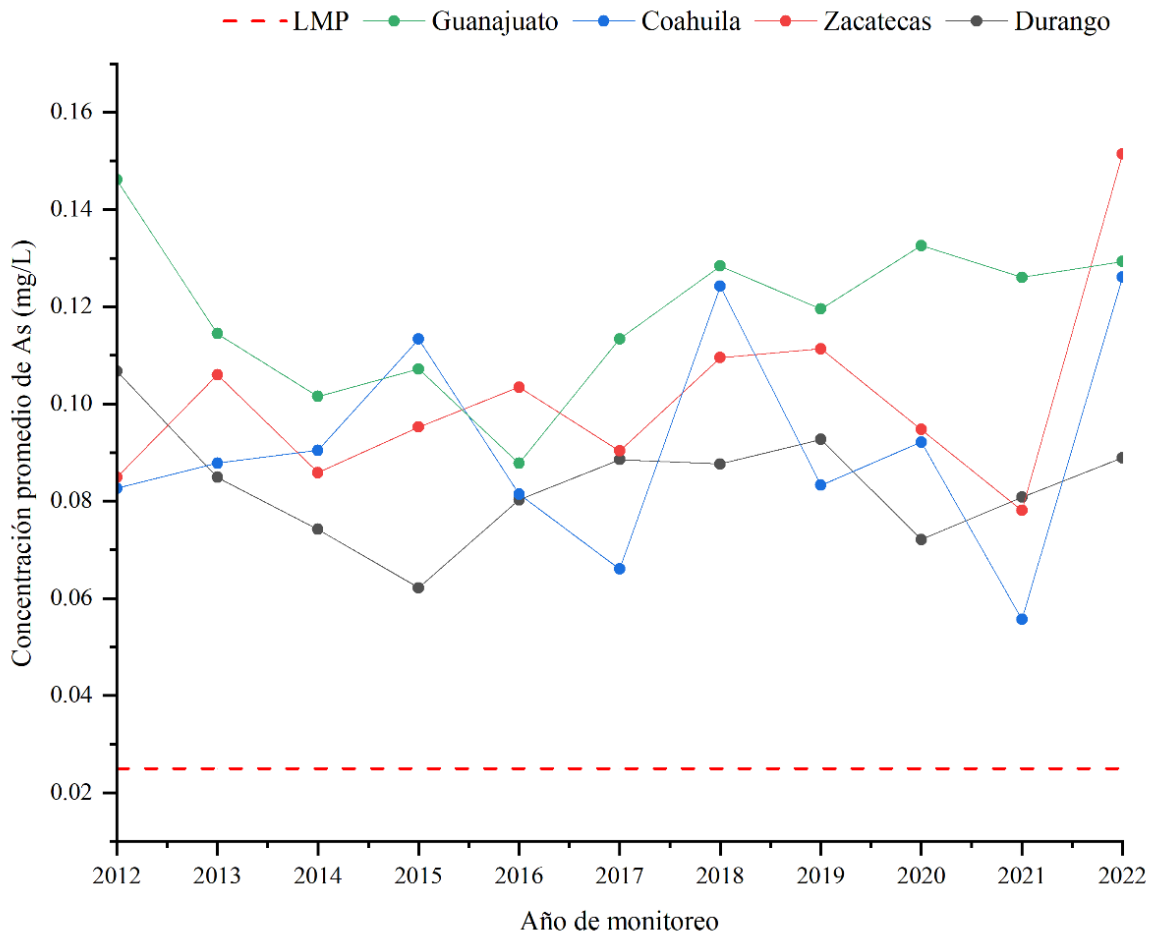


Figura 24. Comportamiento anual de la concentración promedio de As en pozos subterráneos por estado (2012–2022).).

11.9 Índice Ambiental de Arsénico

En esta sección se presentan los valores obtenidos del IAA para todos los pozos persistentes. El IAA se construyó mediante la fórmula ($IAA = A_{S_{prom}} \times A_{S_{máx}} \times N_{>0.05}$) que integra tres componentes: la concentración promedio anual de As registrada en cada pozo durante el periodo 2012–2022, la concentración máxima observada de As y el número de años en los que la concentración superó el valor de referencia de 0.05 mg/L, lo que permite considerar

de manera conjunta la magnitud y la persistencia de la contaminación. En la Tabla 17 se presenta la clasificación de los 88 pozos persistentes en los tres niveles del IAA.

El Nivel 1 agrupa al 14.8% de los sitios (13 pozos), concentrados principalmente en Durango (6). El Nivel 2 con el 17 % de los sitios (15 pozos) y por último el Nivel 3 donde se clasifica el mayor porcentaje con el 68.2% de los sitios, concentrados principalmente en Durango (34), Zacatecas (10), Coahuila (10) y Guanajuato (6).

Tabla 17. Distribución estatal de sitios persistentes por Nivel de clasificación del IAA.

Estado	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Total, por estado
Durango	6	8	34	48
Guanajuato	3	3	6	12
Zacatecas	2	4	10	16
Coahuila	2	0	10	12
Total, por nivel	13	15	60	88

A continuación, se presenta la Tabla 18, en la que se enlistan de manera individual todos los pozos analizados, indicando para cada uno su entidad federativa, su nombre y el nivel de clasificación asignado según IAA.

Tabla 18. Listado de los pozos contaminados y su clasificación según el IAA.

Estado	Nombre del sitio	Clasificación
Durango	Pozo La Estancia.	Nivel 1 - Crítico
	Pozo Luis Moya	Nivel 1 - Crítico
	Pozo Yerbanis	Nivel 1 - Crítico
	Pozo Lázaro Cárdenas	Nivel 1 - Crítico
	Pozo Dieciséis De Septiembre	Nivel 1 - Crítico
	Pozo Col. Hidalgo	Nivel 1 - Crítico
	Pozo 2 Velardeña	Nivel 2 - Moderado
	Pozo 4 Cuencamé	Nivel 2 - Moderado
	Pozo Cerro De Santiago	Nivel 2 - Moderado
	Pozo Cna 4840	Nivel 2 - Moderado
	Pozo Nicolas Bravo	Nivel 2 - Moderado
	Pozo Nuevo Ideal I	Nivel 2 - Moderado
	Pozo 2 Ignacio López Rayón	Nivel 2 - Moderado
	Pozo Las Delicias	Nivel 2 - Moderado
	Pozo Valle Dorado	Nivel 3 - Persistente
	Pozo El Tagarete	Nivel 3 - Persistente
	Pozo La Huerta	Nivel 3 - Persistente

Estado	Nombre del sitio	Clasificación
	Pozo 2 Los Herrera	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Presidios	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Heberto Castillo	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 2 Pedriceña	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 1 Pedriceña	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Vista Hermosa	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 2 Cuencamé	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 1 Cuencamé	Nivel 3 - Persistente
	Pozo J. Agustín Castro	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 3 Peñón Blanco	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Covadonga	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Col. 20 De Nov.	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Col. El Ciprés	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Baylon	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Las Drogas	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Puerto Pinto	Nivel 3 - Persistente
	Pozo San Bernardo	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 5 de Julio	Nivel 3 - Persistente
	Pozo La Torreña (Pozo Transporte)	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 14 San Ignacio (SIDEAPA)	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 32 Pancho Villa (SIDEAPA)	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Bella Unión	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Bruno Martínez	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Canatlán	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Fuente Del Llano	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Toledo	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Nogales	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 7 Libres Picardías	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 1 La Esperanza	Nivel 3 - Persistente
	Pozo San Fermín	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Rodeo	Nivel 3 - Persistente
Guanajuato	18 de Marzo	Nivel 1 - Crítico
	Cerrito de Agua Caliente	Nivel 1 - Crítico
	Comunidad Jaguey de los Serranos	Nivel 1 - Crítico
	Rancho de Guadalupe 2	Nivel 2 - Moderado
	Guadalupe Paso Blanco	Nivel 2 - Moderado
	Comunidad San José de la Estacada	Nivel 2 - Moderado
	Pozo Blanco 2	Nivel 3 - Persistente
	Rancho de Guadalupe 1	Nivel 3 - Persistente

Estado	Nombre del sitio	Clasificación
	Bordo Blanco 2	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 28	Nivel 3 - Persistente
	Ejido Dotación Puerta de Llave	Nivel 3 - Persistente
	Estación de Lourdes - San Luis de la Paz	Nivel 3 - Persistente
Coahuila	Pozo 369 Albia	Nivel 1 - Crítico
	Pozo San Pablo	Nivel 1 - Crítico
	Pozo Nuevo San Isidro	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Alamito	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 529 Gatho	Nivel 3 - Persistente
	Pozo El Cariño	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Gilita 2	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 4074 (Bomba 50 Simas)	Nivel 3 - Persistente
	Paredón 2 - Ejido Cosme	Nivel 3 - Persistente
	Pozo La Candelaria	Nivel 3 - Persistente
	Pozo San Antonio de las Alazanas	Nivel 3 - Persistente
	Pozo Salinas del Rey Sur	Nivel 3 - Persistente
Zacatecas	Camacho 1 (San Marcos)	Nivel 1 - Crítico
	Estancia La Colorada	Nivel 1 - Crítico
	Esteban S. Castorena	Nivel 2 - Moderado
	Ojocaliente	Nivel 2 - Moderado
	El Fuerte	Nivel 2 - Moderado
	General Francisco R Murguía	Nivel 2 - Moderado
	Luis Moya	Nivel 3 - Persistente
	Los Arellano	Nivel 3 - Persistente
	La Mezquitera	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 2 agua potable Sistema Benito Juárez	Nivel 3 - Persistente
	Pozo 524 agua potable Rancho Nuevo (Sustituto Pozo 669 Rancho Nuevo)	Nivel 3 - Persistente
	El Salvador 2 (El Salvador Sal008)	Nivel 3 - Persistente
	Francisco I Madero	Nivel 3 - Persistente
	Gral. Pánfilo Natera	Nivel 3 - Persistente
	Maravillas	Nivel 3 - Persistente
	Concepción del Oro	Nivel 3 - Persistente

11.9.1 Sitios Nivel 1 (Crítico) y la situación hidrogeológica de sus acuíferos

En este apartado, se presenta el resumen de los 13 pozos que están en Nivel 1 (Crítico) y el estado de sobreexplotación de sus acuíferos en los cuatro estados prioritarios. Esta tabla ayuda a identificar los sitios más urgentes de atención, a los que se encuentran en acuíferos sobreexplotados de acuerdo con CONAGUA y aquellos que, pese a su gravedad por concentración de As, se encuentran en acuíferos todavía no sobreexplotados.

Tabla 19. Sitios Nivel 1 - Crítico y la situación hidrogeológica de sus acuíferos.

Estado	Acuífero	Estado del acuífero	Nombre del Sitio
Durango	Providencia	No Sobreexplotado	Pozo La Estancia.
	Valle de Canatlán	Sobreexplotado	Pozo dieciséis de Septiembre
	Valle del Guadiana	Sobreexplotado	Pozo Lázaro Cárdenas Pozo Col. Hidalgo
	Peñón Blanco	No Sobreexplotado	Pozo Luis Moya Pozo Yerbanis
Guanajuato	Pénjamo-Abasolo	Sobreexplotado	18 de Marzo Cerrito de Agua Caliente
	La Muralla	No Sobreexplotado	Comunidad Jaguey de los Serranos
Coahuila	Principal-Región Lagunera	Sobreexplotado	Pozo 369 Albia Pozo San Pablo
	Zacatecas	Camacho	Sobreexplotado
Guadalupe de las Corrientes		Sobreexplotado	Estancia La Colorada

11.10 Distribución espacial del IAA y su relación con factores de presión geológica y antrópica

La siguiente serie de mapas ilustra la distribución espacial de los estados de Durango, Guanajuato, Coahuila y Zacatecas con los sitios clasificados de acuerdo con el IAA, así como su relación con diversos factores de presión antrópica y geológica.

11.10.1 Durango

Para la entidad se destaca un patrón espacial de cercanía entre los pozos y la hidrología de los principales ríos, lo que podría reflejar una interacción entre zonas de captación superficial y recarga contaminada. Por otra parte, los sitios clasificados como Nivel 1 muestran una distribución no aleatoria, presentándose principalmente en las zonas centro y sur del estado. Estos sitios coinciden predominantemente con regiones donde confluyen factores de presión

antrópica (acuíferos sobreexplotados, zonas metropolitanas, sitios de disposición final de residuos y zonas mineras) y presión geológica (estructura volcánica).

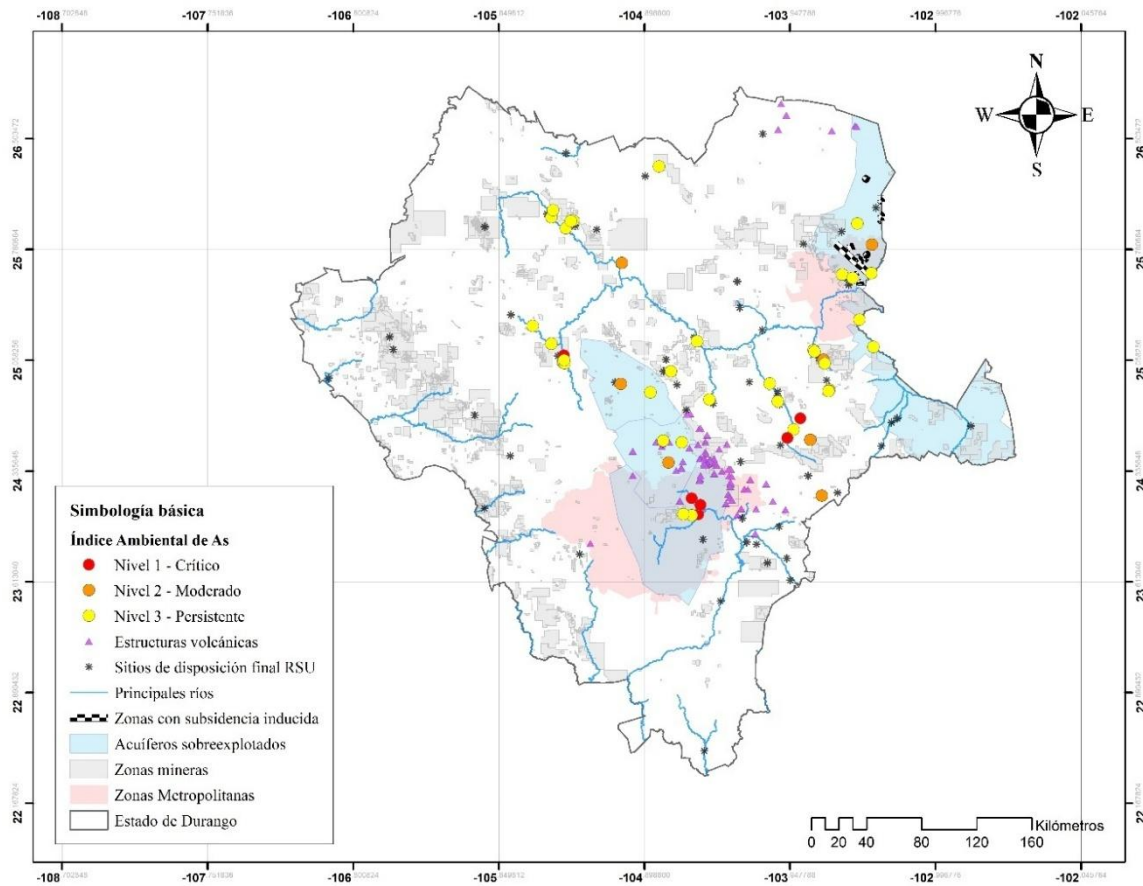


Figura 25. Distribución espacial del IAA y su relación con factores de presión geológica y antrópica en el estado de Durango.

11.10.2 Guanajuato

En el estado se observa una concentración moderada de sitios Nivel 1 ubicados principalmente en el centro-sur, con un pozo fuera y otro dentro de acuíferos sobreexplotados, zonas metropolitanas y presencia de sitios de disposición final de RSU. Los pozos Nivel 2 y 3, se distribuyen de forma más dispersa pero su ubicación refleja una asociación espacial con acuíferos sobreexplotados.

A diferencia de Durango, Guanajuato presenta una mayor extensión de zonas con subsidencia inducida, esta condición refuerza la presión geológica e hidrogeológica que enfrentan los acuíferos en esta región.

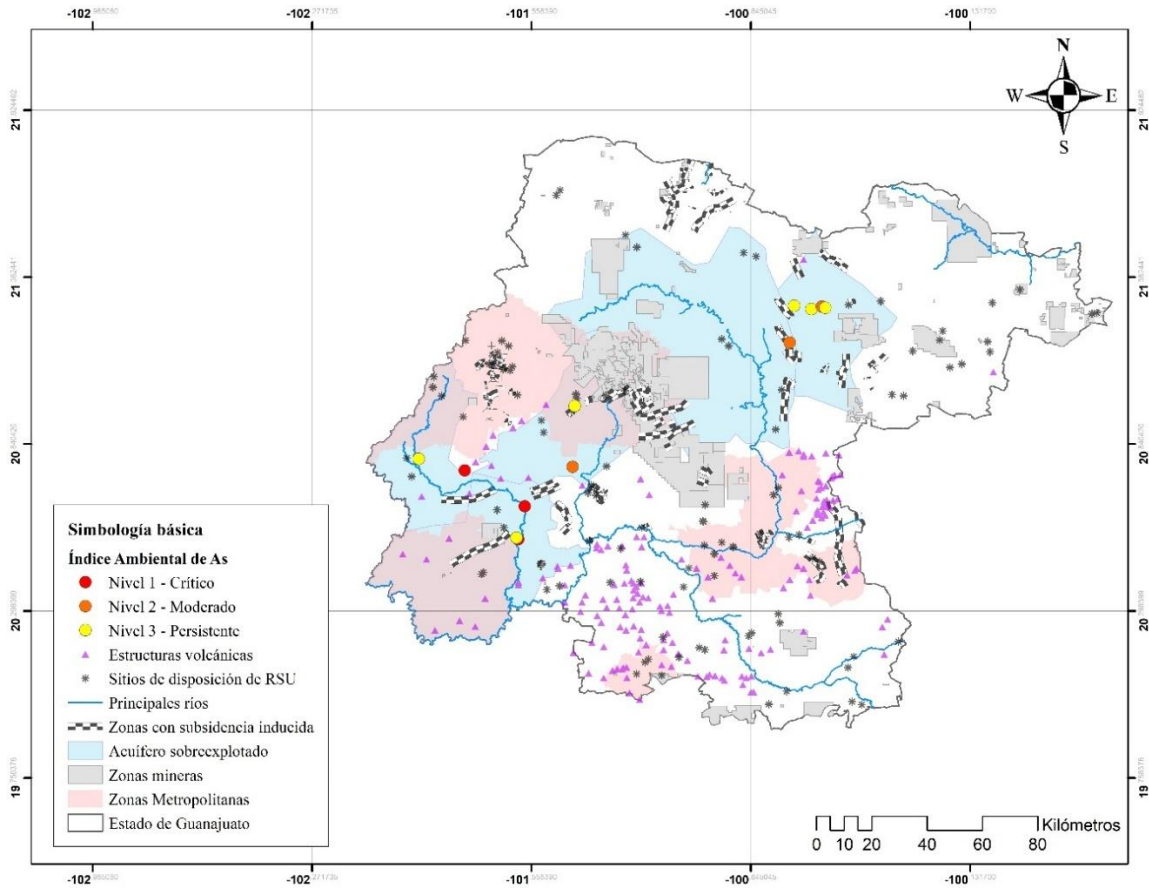


Figura 26. Distribución espacial del IAA y su relación con factores de presión geológica y antrópica en el estado de Guanajuato.

11.10.3 Coahuila

Para Coahuila hay una marcada centralización de pozos en la región de La Laguna, principalmente en la porción sureste del estado, donde se localizan acuíferos compartidos con Durango, como el Principal-Región Lagunera. Esta región también presenta la mayor densidad de subsidencia inducida del estado, con múltiples líneas de deformación que atraviesan municipios.

Todos los pozos Nivel 1 se ubican dentro de acuíferos sobreexplotados, coincidiendo con áreas donde confluyen factores de presión antrópica.

A diferencia de otros estados, en Coahuila no se identificaron pozos en Nivel 2, y los Nivel 3 presentan una distribución más periférica, localizándose hacia los límites estatales o en regiones menos urbanizadas, aunque la mayoría están ubicados dentro de acuíferos sobreexplotados.

Este patrón refuerza la caracterización de la Región Lagunera en Coahuila como un epicentro de contaminación, donde convergen presiones antrópicas y geológicas, favoreciendo la persistencia y movilidad del As en el acuífero.

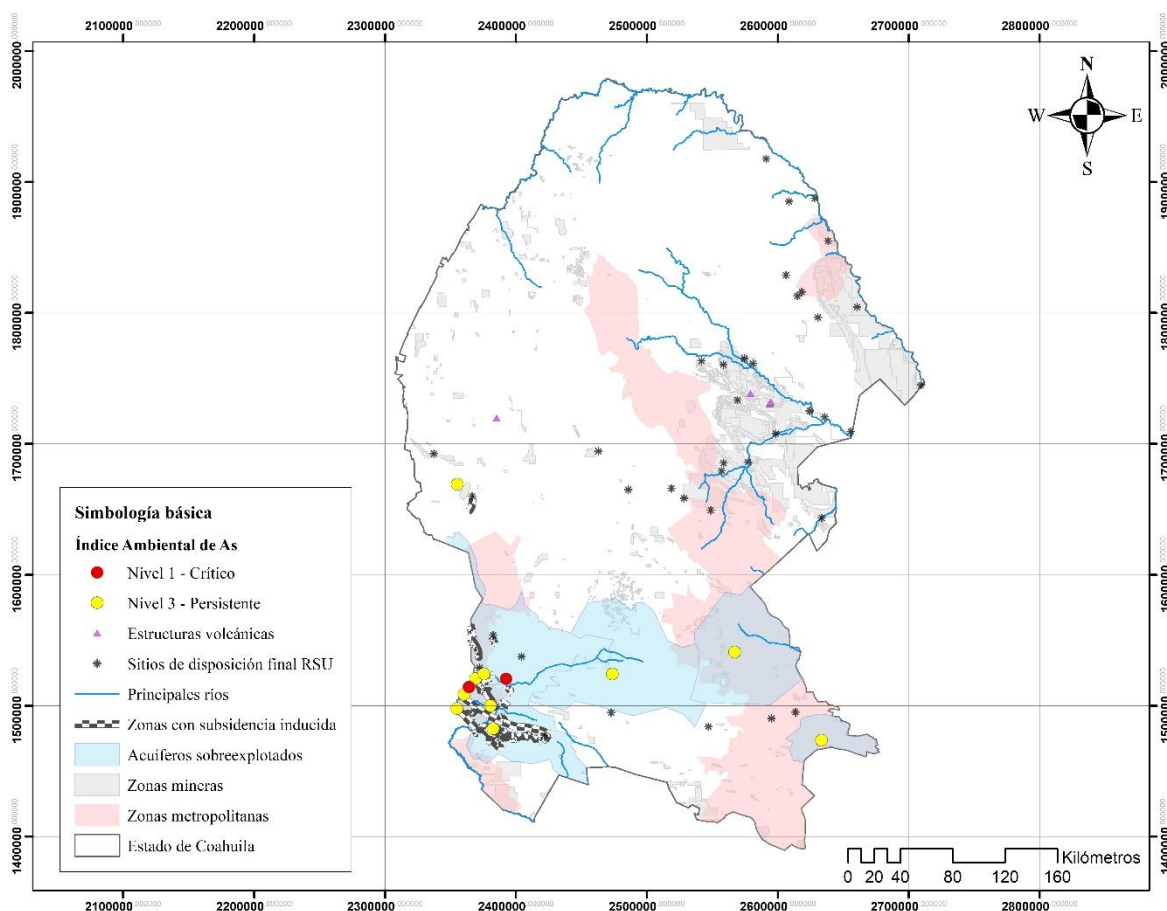


Figura 27. Distribución espacial del IAA y su relación con factores de presión geológica y antrópica en el estado de Coahuila.

11.10.4 Zacatecas

Para el estado de Zacatecas se identifican 16 sitios con As persistente, de los cuales la mitad (8 pozos) se encuentran dentro de acuíferos sobreexplotados y la otra mitad (8 pozos) fuera de estos límites, lo que refleja una distribución espacial balanceada entre zonas con presión hidrogeológica reconocida y otras en las que pueden influir factores adicionales como geología o uso del suelo.

De particular relevancia es que los dos pozos clasificados como Nivel 1 se encuentran fuera de los límites de acuíferos sobreexplotados, lo que evidencia que la alta severidad en estos

puntos no está necesariamente vinculada a la presión por extracción de agua, como ocurre en otros estados.

La mayoría de los pozos moderados y persistentes están ubicados en el sur y sureste del estado, en zonas mineras, con presencia recurrente de estructuras volcánicas y sitios de disposición final de RSU.

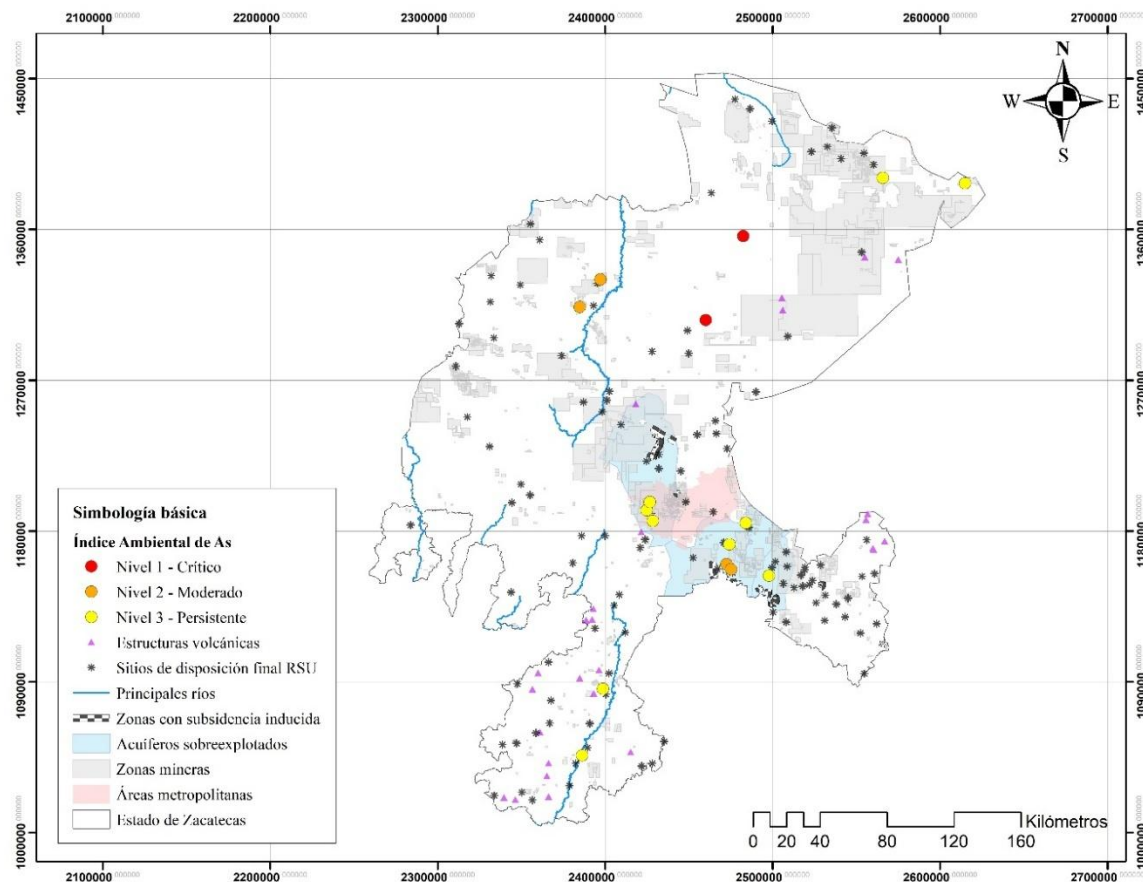


Figura 28. Distribución espacial del IAA y su relación con factores de presión geológica y antrópica en el estado de Zacatecas.

11.11 Pozos representativos para Monte Carlo

Con base en el procedimiento descrito en la Metodología, se obtuvo un único pozo Nivel 1 por estado prioritario para la simulación de Monte Carlo.

En la Tabla 20 se detallan las estadísticas clave y situación del acuífero de cada pozo elegido. Estos cuatro pozos servirán como casos representativos para evaluar mediante Monte Carlo los rangos futuros de concentración de As y la probabilidad de que en 6 años se mantengan en Nivel 1.

Tabla 20. Pozos seleccionados para simulación Monte Carlo: estadísticas y clasificación.

Estado	Acuífero	Situación del acuífero	Nombre del sitio	As _{prom}	As _{max}	Años	ÍAA
Durango	Valle de Guadiana	Sobreexplotado	Pozo Dieciséis de Septiembre	0.254	0.371	9	0.849
Guanajuato	La Muralla	No sobreexplotado	Comunidad Jagüey de los Serranos	0.328	0.528	11	1.906
Coahuila	Principal-Región Lagunera	Sobreexplotado	Pozo 369 Albia	0.239	0.487	9	1.046
Zacatecas	Guadalupe de las Corrientes	No sobreexplotado	Estancia la colorada	0.383	0.505	11	2.125

Nota: As_{prom}: concentración promedio anual de As (mg/L) (2012–2022). As_{max}: concentración máxima registrada de As (mg/L). Años > 0.05: número de años con As > 0.05 mg/L. IAA = As_{prom} × As_{max} × Años > 0.05

11.12 Simulación Monte Carlo

En esta sección se presentan los valores históricos de concentración de As (2012–2022) que sirvieron como base para las simulaciones Monte Carlo (2023–2028) obtenidas mediante dos enfoques en Origin Pro (Simulación mediante construcción manual de algoritmo adaptativo y simulación asistida por la función automatizada del módulo integrado).

11.12.1 Pozo Dieciséis de Septiembre, Durango

La Figura 29 permite comparar los valores históricos desde el 2022 (0.291 mg/L), con un ligero incremento (5.4 %), hasta las simulaciones futuras con concentraciones de As 2028 (0.30678/0.30653 mg/L).

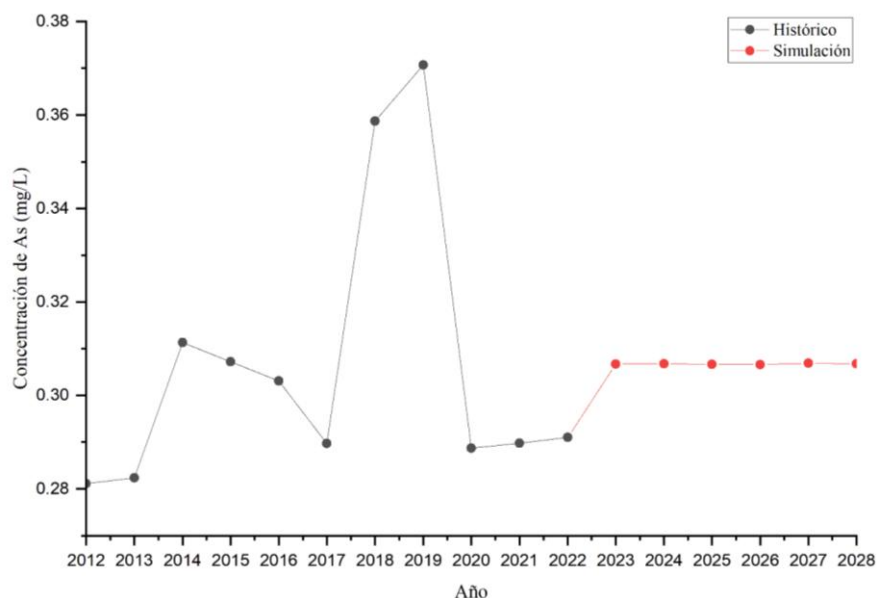


Figura 29. Concentración de As estimada mediante simulación Monte Carlo y datos históricos del pozo Dieciséis de Septiembre, Durango.

La Tabla 21 muestra datos históricos de As entre 2012 y 2022 con concentraciones entre los 0.28–0.37 mg/L. A partir de 2023, las simulaciones Monte Carlo de ambos métodos se estabilizan cerca de 0.306 mg/L, teniendo una desviación relativamente pequeña.

Tabla 21. Comparación de concentraciones de As: valores históricos y proyecciones Monte Carlo (2023–2028).

Año	Histórico (2012-2022)	Simulación mediante construcción manual de algoritmo adaptativo (2023-2028)	Simulación asistida por la función automatizada del módulo integrado (2023-2028)
2012	0.2811		
2013	0.2824		
2014	0.3113		
2015	0.3072		
2016	0.3031		
2017	0.2897		
2018	0.3587		
2019	0.3707		
2020	0.2887		
2021	0.2898		
2022	0.291		
2023		0.30671	0.30682
2024		0.30676	0.30702
2025		0.30667	0.30675
2026		0.30659	0.30645
2027		0.30689	0.30678
2028		0.30678	0.30653

11.12.2 Comunidad Jaguey de los Serranos, Guanajuato

La Figura 30 permite comparar los valores históricos desde el 2022 (0.3350 mg/L), con una ligera disminución (2.5-4.5 %), hasta las simulaciones futuras con concentraciones de As 2028 (0.32194/0.32781mg/L).

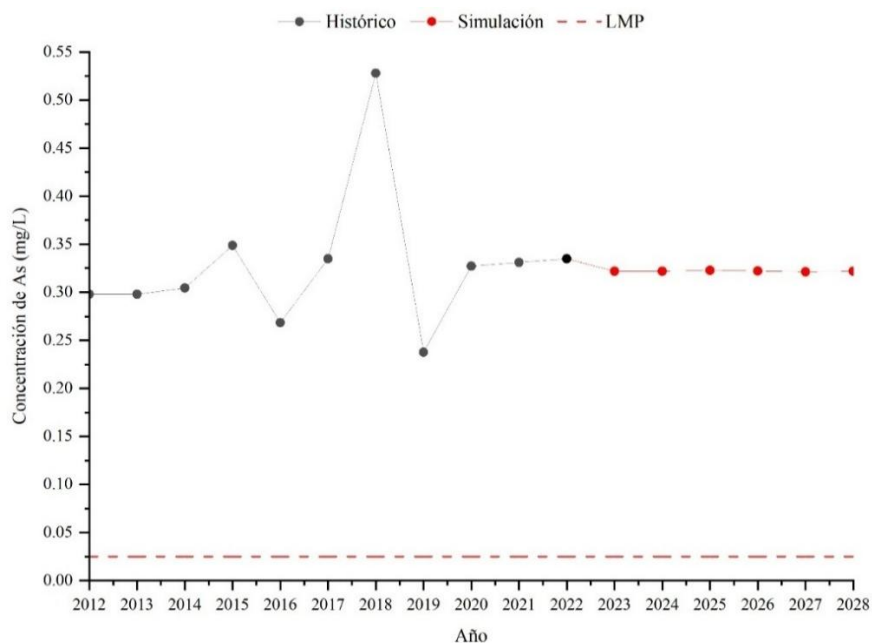


Figura 30. Concentración de As estimada mediante simulación Monte Carlo y datos históricos del pozo Comunidad Jaguey de los Serranos, Guanajuato.

La Tabla 22 muestra datos históricos de As entre 2012 y 2022 con concentraciones entre los 0.23–0.34 mg/L. Con un pico máximo de 0.52 en 2018, que sugiere un evento aislado. A partir de 2023, las simulaciones Monte Carlo de ambos métodos se estabilizan cerca de 0.32 mg/L, teniendo una desviación decreciente relativamente pequeña.

Tabla 22. Comparación de concentraciones de As: valores históricos y proyecciones Monte Carlo (2023–2028).

Año	Histórico (2012-2022)	Simulación mediante construcción manual de algoritmo adaptativo (2023-2028)	Simulación asistida por la función automatizada del módulo integrado (2023-2028)
2012	0.2980		
2013	0.2980		
2014	0.3044		
2015	0.3489		
2016	0.2683		
2017	0.3348		
2018	0.5278		
2019	0.2376		
2020	0.3272		
2021	0.3309		
2022	0.3350		
2023		0.32	0.32
2024		0.32	0.32
2025		0.32	0.32
2026		0.32	0.32
2027		0.32	0.32
2028		0.32	0.32

2023	0.32193	0.32831
2024	0.32200	0.32884
2025	0.32288	0.32892
2026	0.32220	0.32811
2027	0.32140	0.32825
2028	0.32194	0.32781

11.12.3 Pozo 369 Albia, Coahuila

La Figura 31 permite comparar los valores históricos desde el 2012 (0.0470 mg/L) hasta las simulaciones futuras con concentraciones de As 2028 (0.28302/0.27862 mg/L), con un incremento aproximado del 17 % respecto al promedio histórico.

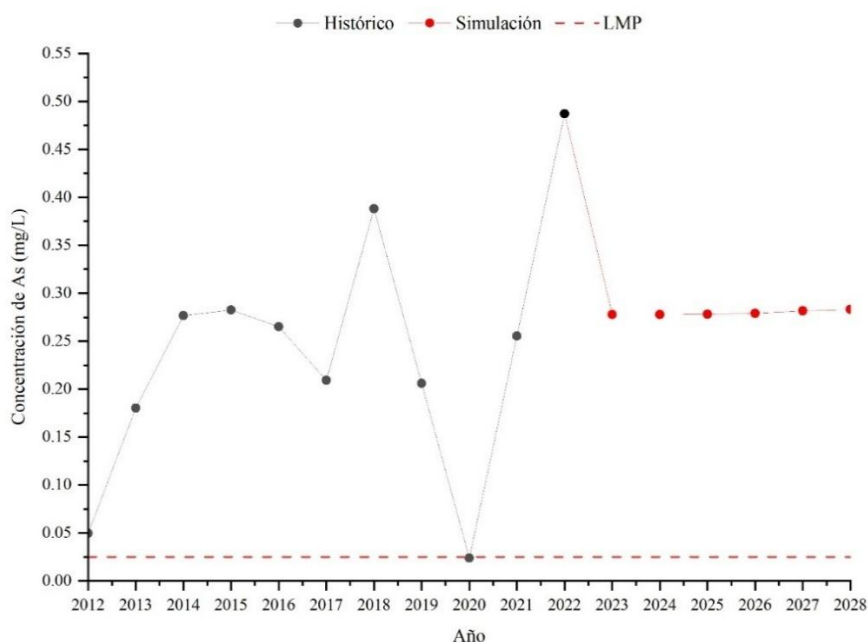


Figura 31. Concentración de As estimada mediante simulación Monte Carlo y datos históricos del pozo 369 Albia, Coahuila.

La Tabla 23 muestra datos históricos de As entre 2012 y 2022 con concentraciones entre los 0.04–0.28 mg/L. Con dos picos máximos de 0.38 en 2018 y 0.48 en 2022. A partir de 2023, las simulaciones Monte Carlo de ambos métodos aumentan (0.279 mg/L) considerablemente respecto a la media histórica (0.2385 mg/L).

Tabla 23. Comparación de concentraciones de As: valores históricos y proyecciones Monte Carlo (2023–2028).

Año	Histórico (2012-2022)	Simulación mediante construcción manual de algoritmo adaptativo (2023-2028)	Simulación asistida por la función automatizada del módulo integrado (2023-2028)
2012	0.0497		
2013	0.1802		
2014	0.2767		
2015	0.2825		
2016	0.2651		
2017	0.2092		
2018	0.3882		
2019	0.2060		
2020	0.0238		
2021	0.2554		
2022	0.4870		
2023		0.27795	0.27819
2024		0.27776	0.27812
2025		0.27796	0.27801
2026		0.27910	0.27775
2027		0.28161	0.27935
2028		0.28302	0.27862

11.12.4 Estancia La Colorada, Zacatecas

La Figura 32 permite comparar los valores históricos desde el 2022 (0.4580 mg/L) hasta las simulaciones futuras con concentraciones de As 2028 (0.41527/0.41656mg/L), con un incremento aproximado del 8.7 % respecto al promedio histórico.

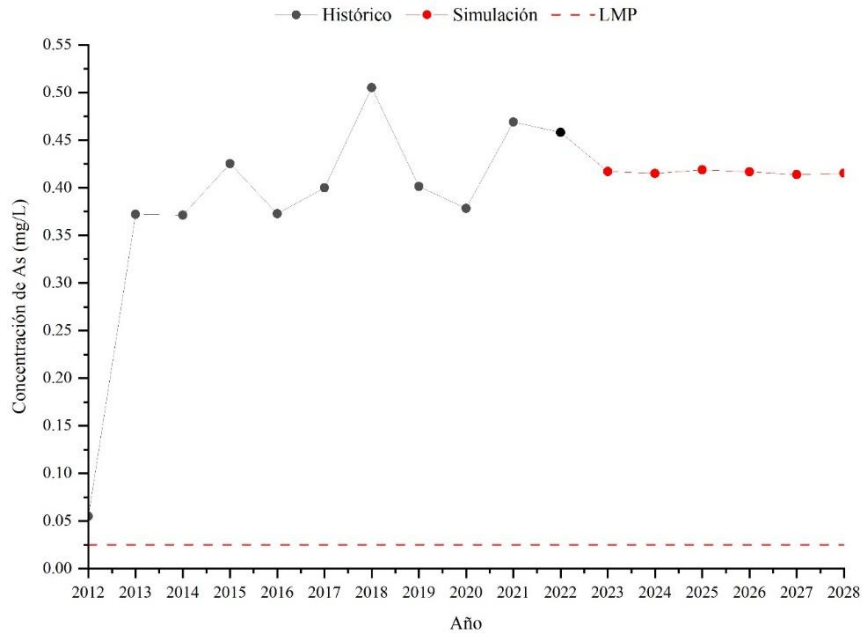


Figura 32. Concentración de As estimada mediante simulación Monte Carlo y datos históricos del pozo Estancia La Colorada, Zacatecas.

La Tabla 24 muestra datos históricos de As entre 2012 y 2022 con concentraciones entre los 0.05–0.46 mg/L. Con un pico máximo de 0.5051 en 2018. A partir de 2023, las simulaciones Monte Carlo de ambos métodos aumentan (0.416 mg/L) considerablemente respecto a la media histórica (0.3826 mg/L).

Tabla 24. Comparación de concentraciones de As: valores históricos y proyecciones Monte Carlo (2023–2028).

Año	Histórico (2012-2022)	Simulación mediante construcción manual de algoritmo adaptativo (2023-2028)	Simulación asistida por la función automatizada del módulo integrado del módulo integrado (2023-2028)
2012	0.0549		
2013	0.3720		
2014	0.3713		
2015	0.4253		
2016	0.3728		
2017	0.3998		
2018	0.5051		
2019	0.4013		
2020	0.3784		
2021	0.4691		
2022	0.4580		
2023		0.41718	0.41697

2024	0.41483	0.4184
2025	0.41876	0.41524
2026	0.41669	0.41538
2027	0.41387	0.41603
2028	0.41527	0.41656

11.13 Características de los Acuíferos empleados en simulación Monte Carlo

11.13.1 Acuífero Valle de Guadiana

Área de estudio

El acuífero Valle del Guadiana 1003 determinado por CONAGUA, se localiza en la región centro-sur del estado de Durango, entre los paralelos 23° 27' y 24° 29' de latitud norte y 104° 19' y 105° 08' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 4,817 km².

Tipo de acuífero

De acuerdo con CONAGUA (2024), el acuífero Valle del Guadiana (1003) es libre, heterogéneo y anisótropo, rasgo que se refleja en su compleja arquitectura estratigráfica. La unidad superior está constituida por sedimentos aluviales, fluviales, lacustres y de pie de monte, acompañados de conglomerados polimícticos de varios metros de espesor en el centro del valle; estas unidades, con intercalaciones arcillosas que generan zonas de semiconfinamiento local, conforman la principal porción productiva del acuífero y favorecen una recarga activa.

En profundidad, el sistema se apoya sobre un conjunto de rocas volcánicas fracturadas —tobas ácidas, riolitas, ignimbritas, andesitas y basaltos— cuya permeabilidad depende de la continuidad de las fracturas secundarias; cuando estas desaparecen, las mismas litologías funcionan como basamento geohidrológico y actúan como límite al flujo subterráneo. Aún más abajo, las calizas alternadas con lutitas y limolitas constituyen unidades profundas de permeabilidad secundaria, con capas que pueden presentar semiconfinamiento o confinamiento según el grado de fracturamiento.

Esta disposición estratigráfica es típica de acuíferos altamente heterogéneos, donde las variaciones en granulometría, facies y estructuras internas controlan de manera significativa la circulación del agua y el transporte de solutos. Estudios de modelación comparativa han demostrado que la conectividad entre facies determina los tiempos de residencia y la

dispersión de contaminantes en sistemas fluvio-deltaicos y complejos sedimentarios similares (Savoy et al., 2017). En este contexto, el Valle del Guadiana, caracterizado por la superposición de sedimentos recientes sobre unidades volcánicas fracturadas; presenta condiciones que imponen direccionalidades preferentes de flujo, influidas tanto por la continuidad de fracturas como por la reactividad geoquímica de los materiales superficiales y subyacentes.

Clima

El clima del acuífero es semiárido templado con verano cálido (BS1kw), de acuerdo con INEGI (2024), con franjas orientadas suroeste–noreste. La precipitación media anual es de 530.9 mm, concentrada en verano, con máximos en junio (≈ 70 mm) y septiembre (≈ 80 mm). La temperatura media anual general es de 17.5 °C, aunque en la porción suroccidental CE(w2) (semifrío subhúmedo) baja a 5–12 °C, y en áreas C(w1) y C(w2) (templado subhúmedo) se mantiene en 12–18 °C, con cociente precipitación/temperatura de 43.2–55.0 (C(w1)) y > 55.0 (C(w2)).

El régimen de lluvias concentrado en verano favorece recargas estacionales, pero el contraste con el largo periodo seco y la alta evapotranspiración potencial ($\approx 1,832$ mm) sugiere un balance hídrico deficitario gran parte del año.

Geomorfología

El acuífero presenta tres unidades morfoestructurales principales (Martínez-Gutiérrez y Sethi, 1997 y Gastil et al.1981):

1. Lomeríos (centro-sur):
 - Litología: rocas riolíticas de la serie volcánica superior.
 - Drenaje: paralelo y sub paralelo de baja densidad.
 - Pendientes: 5–7°.
2. Mesetas:
 - Norte y noreste: coladas de basaltos de olivino (cuaternarios), estructura vesicular con diaclasas y fracturas; altitud máxima $\sim 1\ 900$ msnm; desnivel respecto al valle de hasta 40 m; drenaje escaso y pendientes suaves.
 - Occidente: rocas riolíticas, altitudes hasta 2 200 msnm; desnivel de ~ 300 m; drenaje sub paralelo poco desarrollado.

3. Sierras:

- Sierra El Registro (sureste, orientación N–S): tobas en la base e ignimbritas en la cumbre; altitud ~2 600 msnm; desnivel medio de 700 m.
- Sierra La Paila (noreste, orientación NW): rocas riolíticas.

La variación en drenaje y pendiente entre las zonas inferiores (tobas, poco consolidadas, sin corrientes superficiales) y superiores (ignimbritas y riolitas, más consolidadas, favorecen drenaje) se explica por su distinta resistencia al flujo de agua. En las cúspides de las sierras se observan escarpes de origen erosivo y tectónico.

En el Valle del Guadiana, la coexistencia de frágiles litologías volcánicas arsenicales y largos tiempos de contacto agua–roca, la alta tasa de evaporación, potenciados por drenaje escaso, favorecen la movilización y acumulación de As en la zona freática. Además, las fracturas secundarias en tobas, riolitas e ignimbritas, como ya se ha demostrado en estudios de heterogeneidad de acuíferos demuestran ser un factor importante de la arquitectura interna en el transporte de solutos.

Geología

En el Cenozoico superior, el valle queda cubierto por la Formación Guadiana (sedimentos fluviales) y por la Secuencia Volcánica Durango (~800 m de flujos de ceniza riolítica), que a su vez es rasgada por derrames de basaltos miocenos y cuaternarios y cubierta en la actualidad por depósitos aluviales y lacustres recientes. Finalmente, en sectores costeros o de falla, afloran andesitas metamorfizadas de origen volcánico marino (Taxicaringa, La Quebrada, La Guásima, Santa María de Gracia).

En conjunto, el acuífero se desarrolla principalmente sobre el Supergrupo Volcánico Superior y la Secuencia Volcánica Durango, con intercalaciones de sedimentos fluviales del Cenozoico superior, controlado estructuralmente por fallas locales que facilitan la circulación y recarga del agua subterránea.

Al respecto, Harvey et al. (2005) demostraron que los sedimentos más jóvenes liberan cantidades significativamente mayores de As que los más antiguos, y que la alternancia de ambos crea patrones complejos de concentración en el acuífero que dependen de su evolución geomorfológica y geoquímica.

Aprovechamientos e hidrometría

El censo de aprovechamientos realizado por CONAGUA (2014) reporta una extracción total anual de 158.2 hm³ en el acuífero Valle del Guadiana, distribuida principalmente en los usos público-urbano (54.5 %) y agrícola (36.9 %), mientras que los sectores industriales, de servicios y usos múltiples representan proporciones menores. Adicionalmente, los manantiales descargan 25 L/s (≈ 0.8 hm³/año), destinados sobre todo a actividades domésticas y pecuarias. Esta estructura de uso evidencia una fuerte presión sobre el acuífero, particularmente asociada al riego agrícola y al abastecimiento urbano.

La intensidad de la extracción ha contribuido al abatimiento sostenido del nivel freático, fenómeno documentado en estudios recientes que muestran descensos superiores a 0.5 m/año en zonas de agricultura extensiva (Jasechko et al., 2024). Esta tendencia, que se ha acelerado en las últimas décadas, agrava el déficit hídrico regional y modifica las condiciones redox del subsuelo, lo que a su vez favorece la liberación de arsénico desde las fases sólidas hacia la solución. En conjunto, el patrón de aprovechamiento y el estrés hídrico asociado explican en gran medida la vulnerabilidad actual del acuífero y su comportamiento persistente en las concentraciones de As.

Disponibilidad de agua subterránea y antecedentes de contaminación

La Disponibilidad Media Anual (DMA) de agua subterránea se calcula utilizando la fórmula de la NOM-011-CONAGUA-2015: $DMA = R - DNC - VEAS$

$$\text{Cálculo: } DMA = 131.9 - 7.4 - 145.324352 \quad DMA = -20.824352 \text{ hm}^3/\text{año}$$

El acuífero presenta un déficit de 20,824,352 m³ anuales, lo que indica sobreexplotación y la imposibilidad de otorgar nuevas concesiones de agua subterránea (CONAGUA, 2024). La condición de balance negativo refleja un sistema sometido a estrés hídrico persistente donde la extracción supera de manera sostenida a la recarga, lo que modifica las condiciones hidráulicas y geoquímicas del subsuelo.

Este estrés hídrico ha coincidido históricamente con la presencia de As en concentraciones elevadas, fenómeno documentado desde finales de la década de 1990. Martínez et al. (2013) reportaron que, desde las primeras campañas de monitoreo en 1996, múltiples pozos del acuífero superaban el límite permisible de 0.025 mg/L, registrando valores de hasta 0.149 mg/L ($\approx 6 \times$ LMP) en el pozo de Colonia Hidalgo y afectando aproximadamente al 67 % de

las fuentes evaluadas en Durango capital. La persistencia de estos valores, aunada a la condición de sobreexplotación actual, sugiere que los cambios en los niveles piezométricos, los ciclos redox inducidos por el abatimiento y los tiempos prolongados de contacto agua-roca han favorecido la movilización del As en este sistema.

11.13.2 Acuífero La Muralla

Área de estudio

El acuífero *La Muralla 1111* determinado por CONAGUA, se localiza en la región centro-occidental del estado de Guanajuato, entre 20° 44' y 20° 59' de latitud norte, y los meridianos 101° 39' y 101° 49' de longitud oeste cubriendo una superficie aproximada de 241 km².

Tipo de acuífero

De acuerdo con CONAGUA (2024), el acuífero es libre a semiconfinado, heterogéneo y anisótropo. Su configuración actual es una combinación de materiales aluviales, areniscas y rocas volcánicas fracturadas, intercaladas con piroclastos y sedimentos arcillosos.

El sistema se encuentra alojado en una fosa tectónica delimitada por pilares. La permeabilidad depende del grado de fracturamiento y del tipo de roca, lo que genera diferencias locales en la transmisividad y caudal de los pozos.

Clima

El área cubierta por el acuífero predomina templado, con lluvias en verano e invierno seco. La temperatura del mes más cálido es superior a 22° C y es anterior al solsticio de verano.

El régimen de lluvias se concentra principalmente entre junio y septiembre. La máxima ocurrencia se registra en el mes de agosto. La época de estiaje ocurre entre los meses de noviembre y abril.

Geomorfología

El acuífero presenta gran diversidad geomorfológica influenciada por el Cinturón Volcánico Mexicano, producto de procesos endógenos, principalmente el vulcanismo y la tectónica de placas, y procesos exógenos, como la acción del agua superficial y subterránea.

1. Relieves volcánicos acumulativos (sur de Santiago Maravatío). Conservan morfologías originales, representando las formas volcánicas más recientes del área.

- Material predominante: lavas riolíticas y basálticas de edad Plio–Cuaternaria.
- Origen: Vulcanismo reciente asociado al Cinturón Volcánico Mexicano.

- Relieve joven, con pendientes moderadas ($\sim 10^\circ$), escasa disección del terreno y baja erosión.
2. Relieves volcánicos–denudatorios (Sierra de los Agustinos). Representan áreas donde el vulcanismo antiguo fue modificado intensamente por la erosión.
- Material predominante: derrames de lava y productos piroclásticos.
 - Altitud aproximada: 2,000–2,400 msnm.
 - Origen: Vulcanismo Paleógeno–Neógeno y procesos erosivos posteriores.
 - Mayor profundidad y densidad de disección, con un relieve irregular.
3. Planicie aluvial del valle de Salvatierra. Es una de las principales zonas de recarga y acumulación de agua subterránea.
- Material predominante: arenas, limos, arcillas y piroclastos finos.
 - Altitud aproximada: 1,740–1,800 msnm.
 - Origen: procesos fluvio-aluviales y tectónicos del Plio-Cuaternario.
 - Relieve plano con pendientes suaves ($< 3^\circ$) y depósitos de granulometría fina.
4. Abanicos aluviales cuaternarios (zona de pie de monte). Favorecen el paso del agua superficial hacia las zonas de almacenamiento subterráneo.
- Material predominante: mezcla de gravas, arenas, limos y bloques.
 - Altitud aproximada: 1,800–2,000 msnm.
 - Origen: procesos de arrastre y depósito fluvial cuaternarios.
 - Relieve de transición entre sierras y planicies, con permeabilidad variable.
5. Superficie semiplana del valle de Silao–Romita. Zona de sedimentación reciente que conserva materiales finos y homogéneos.
- Material predominante: depósitos aluviales recientes (limos y arcillas).
 - Altitud aproximada: 1,750–1,850 msnm.
 - Origen: depósitos fluviales del Reciente.
 - Pendientes suaves ($2\text{--}3^\circ$), relieve ligeramente ondulado con cerros y lomeríos aislados.
6. Zona de la batería de pozos “La Muralla”. Área principal de extracción y monitoreo de agua subterránea del acuífero.
- Material predominante: sedimentos finos de tipo aluvial (limos y arenas).
 - Altitud aproximada: $\sim 1,800$ msnm.
 - Origen: depósitos de planicie aluvial.

- Relieve ondulado, con lomeríos suaves y buena infiltración.

7. Sierra El Huizache (sector sur del acuífero). Actúa como divisor de aguas y límite topográfico natural del acuífero.

- Material predominante: rocas volcánicas fracturadas y materiales antiguos erosionados.
- Altitud aproximada: >2,500 msnm.
- Origen: estructural–tectónico, con orientación NW–SE.
- Relieve elevado, con valles estrechos, terrazas y lomeríos erosionados.

Geología

La región se caracteriza por presentar numerosos aparatos volcánicos de diversas estructuras entre los que destacan conos, maars y derrames, que en general conservan su estructura original lo que evidencia su relativa juventud geológica y el bajo grado de erosión.

Aprovechamientos e hidrometría

El acuífero La Muralla, es uno de los abastecimientos más importantes de León, conformado por 19 pozos que operan de manera continua desde su instalación en 1992 (CONAGUA, 2020).

En el censo de aprovechamientos de 2003, hay un registro de 74 pozos dentro del acuífero de estos 61 se encuentran activos y 13 inactivos. El aprovechamiento de estos está dividido en 20 (27.0 %) se destinan a uso agrícola, 1 (1.4 %) al uso pecuario, 34 (45.9 %) para uso público-urbano y 19 (25.7 %) para otros usos pecuarios (CONAGUA, 2003).

De acuerdo con Ramos, et al. (2005), el descenso del nivel freático se reporta entre 1992 y 1997 como consecuencia de una fuerte extracción que excedía la capacidad natural de recarga del acuífero. Este comportamiento también fue documentado en otro estudio del mismo autor y colaboradores en el periodo de 1994 y 1999, donde analizaron 629 muestras de agua subterránea del acuífero revelando tendencias decrecientes del contenido de cloruros.

El fenómeno de desmineralización progresiva del agua subterránea bombeada se interpreta como un proceso de dilución derivado de la recarga local meteórica pobre en sales. Indicando que el acuífero ha entrado en una etapa de agotamiento del almacenamiento debido a que el flujo ascendente de agua antigua y mineralizada está siendo sustituido por agua más reciente y menos concentrada, producto de la recarga superficial.

Disponibilidad de agua subterránea en el acuífero

La Disponibilidad Media Anual (DMA) de agua subterránea se calcula utilizando la fórmula de la NOM-011-CONAGUA-2015: $DMA = R - DNC - VEAS$

Cálculo: $DMA = 34.8 - 5.0 - 40.141518$ $DMA = -10.341518$ - hm³/año

El acuífero presenta un déficit de 10,341,518 m³ anuales, lo que indica sobreexplotación y la imposibilidad de otorgar nuevas concesiones de agua subterránea (CONAGUA, 2003).

En La Muralla, se refleja un estado de sobreexplotación crónica, donde, además la coexistencia de caídas piezométricas sostenidas, desmineralización del agua, la persistencia de bombeo intensivo y la interacción con unidades volcánicas fracturadas favorecen la movilización y acumulación de As en sus aguas. Este escenario constituye un caso representativo de agotamiento progresivo de las reservas subterráneas bajo condiciones de presión antrópica intensa, similar a lo documentado en otros acuíferos del Bajío y del Altiplano Mexicano.

11.13.3 Acuífero Principal-Región Lagunera

Área de estudio

El acuífero *Principal-Región Lagunera 0523*, determinado por CONAGUA, se localiza en el extremo suroccidental del estado de Coahuila, entre los paralelos 25°00' y 26°45' de latitud norte y los meridianos 102°15' y 103°50' de longitud oeste. Abarca una superficie aproximada de 12,617 km², convirtiéndose en uno de los sistemas hidrogeológicos más extensos y estratégicos del norte de México.

La relevancia de este acuífero trasciende por su tamaño y ubicación, su deterioro constituye uno de los casos más severos de contaminación crónica por As en América Latina. De acuerdo con los análisis realizados por Díaz et al. (2013), esta condición histórica y persistente ha posicionado a la Región Lagunera como un foco prioritario de atención en materia de calidad del agua subterránea y salud pública.

Tipo de acuífero

De acuerdo con CONAGUA (2024), el acuífero Principal de la Región Lagunera es libre a semiconfinado, heterogéneo y anisótropo, con dos medios hidrogeológicos dominantes: un sistema poroso en la zona superior, compuesto por depósitos aluviales, fluviales y lacustres de granulometría variada, y un sistema fracturado en el medio inferior, integrado por rocas calcáreas y materiales volcánicos con permeabilidad controlada por fracturas. Esta

configuración estratificada determina la circulación del agua y la distribución espacial de la recarga y el almacenamiento.

La geometría irregular del basamento, la presencia de intercalaciones arcillosas y la marcada heterogeneidad de los sedimentos granulares influyen de manera directa en la dinámica del acuífero, generando variaciones locales en la movilidad del agua y en los procesos geoquímicos asociados. Como señalan Mejía et al. (2014), estas condiciones favorecen procesos diferenciales de liberación de metales, debido a que los contrastes en litología, facies y conectividad controlan la adsorción, desorción y transporte de elementos como el As dentro del sistema.

Clima

El área cubierta por el acuífero predomina clima seco a desértico (BWhw), semicálido y con invierno seco, caracterizado por altas variaciones térmicas y escasa precipitación. Existen condiciones áridas y de recarga limitada, donde la evaporación supera ampliamente a la precipitación.

Geomorfología

El acuífero presenta cinco unidades geomorfológicas

1. Valles. conforman el núcleo del acuífero, donde predominan las actividades agrícolas y urbanas. Se desarrollan entre las sierras de Parras y La Candelaria (oriente), Las Noas y El Sarnoso (occidente), y los ríos Nazas y Aguanaval.

- Material predominante: Depósitos aluviales y fluviales recientes (arenas, limos y gravas finas).
- Origen: Procesos de sedimentación fluvial y aluvial.
- Pendientes suaves, drenaje escaso y alta capacidad de infiltración; constituyen las principales zonas de recarga del acuífero.

2. Depresiones. se acumulan sedimentos finos y el drenaje superficial es limitado o nulo. Asociadas a las lagunas de Mayrán y Viesca, con conexión hidrogeológica hacia el sistema principal.

- Material predominante: Limos, arcillas y arenas finas.
- Origen: Hundimientos locales y procesos de acumulación en ambientes lacustres o fluviales.
- Zonas de infiltración difusa y almacenamiento temporal de agua.

3. Lomeríos. relieves suaves que conectan las planicies con las sierras.
 - Material predominante: Rocas volcánicas y sedimentarias fracturadas.
 - Origen: Erosión diferencial de antiguos depósitos volcánicos y sedimentarios.
 - Rasgos: Pendientes moderadas y dirección del escurrimiento hacia los valles principales.
4. Mesetas. enmarcan el área al norte y poniente del acuífero con infiltración variable.
 - Material predominante: rocas consolidadas (pelíticas, calizas y materiales volcánicos fracturados).
 - Origen: Vulcanismo y procesos erosivos del relieve antiguo.
5. Sierras. conforman las áreas de mayor escurrimiento superficial. Funcionan como barreras naturales del acuífero
 - Material predominante: rocas volcánicas, calizas y conglomerados fracturados.
 - Altitud aproximada: 1,500–2,800 msnm.
 - Origen: Levantamientos tectónicos y procesos erosivos intensos.
 - Ubicación:
 - Oriente: *Sierras de Parras y La Candelaria.*
 - Occidente: *Sierras Las Noas y El Sarnoso.*
 - Norte: *Sierras Delicias, Tlahualilo y La Campana.*
 - Sur: *Sierras Jimulco y Pozo de Calvo.*

Geología

La región se caracteriza por estar en el límite entre dos provincias geológicas, la Sierra Madre Oriental y la Cuenca de Parras.

De acuerdo con Mejía, et al. (2014) demostraron que el As disponible en el acuífero se encuentra principalmente adsorbido en los óxidos de hierro amorfos y cristalinos presentes en los sedimentos aluviales. Donde influyen condiciones reductoras locales asociadas a la materia orgánica y al exceso de riego que favorecen la disolución de óxidos de Fe y la movilización del As adsorbido, lo que indica un alto potencial de liberación bajo perturbaciones del sistema.

Aprovechamientos e hidrometría

El uso intensivo del agua subterránea en la Comarca Lagunera se remonta al auge del algodón irrigado en los años cuarenta y cincuenta, cuando la región se consolidó como polo

agroindustrial del norte del país. Actualmente la sustitución del cultivo de algodón por forrajes y ganadería lechera agravó la presión sobre el acuífero.

De acuerdo con el censo de aprovechamientos (CONAGUA, 2002), hay un registro de 2,350 pozos dentro del acuífero. 1,494 son para uso agrícola, 184 para uso doméstico, 64 más para uso industrial, 143 para uso pecuario, 136 para abastecimiento de agua potable, 39 para servicios y 290 para usos múltiples.

La extracción intensiva ha generado descensos piezométricos con caídas notorias en zonas agrícolas intensivas (Hernández, et al. 2022). Este proceso evidencia un patrón de sobreexplotación que combina presión agrícola, industrial y doméstica (Salas, 2004).

Disponibilidad de agua subterránea y comportamiento del As

La Disponibilidad Media Anual (DMA) de agua subterránea se calcula utilizando la fórmula de la NOM-011-CONAGUA-2015: $DMA = R - DNC - VEAS$

Cálculo: $DMA = 534.1 - 0.0 - 645.546022$ $DMA = -111.446022$ hm³ anuales

El acuífero presenta un déficit de 111,446,022 m³ anuales, lo que indica sobreexplotación y la imposibilidad de otorgar nuevas concesiones de agua subterránea (CONAGUA, 2002).

La problemática del As en la Región Lagunera tiene antecedentes históricos profundos. Los primeros casos de hidroarsenicismo en humanos y animales asociados al consumo de agua subterránea fueron documentados a inicios de la década de 1960 (Hernández et al., 2022). Investigaciones posteriores identificaron zonas con concentraciones superiores a 0.025 mg/L (CINVESTAV, 1986; IMTA, 1992) y, en casos extremos, valores de hasta 0.85 mg/L, equivalentes a 34 veces el Límite Máximo Permisible (Viniegra, 1966). La recurrencia de estas concentraciones demuestra que la contaminación no es un fenómeno reciente, sino un problema persistente arraigado en las condiciones naturales del acuífero y agravado por el uso intensivo del recurso.

El estado actual del acuífero refleja la interacción entre procesos naturales de lixiviación y una sobreexplotación agrícola e industrial que ha intensificado la liberación y acumulación del As disuelto. El abatimiento sostenido del nivel freático favorece condiciones oxidantes que promueven la desorción del As previamente adsorbido en minerales del sedimento, mientras que la disminución del almacenamiento reduce la capacidad de depuración natural del sistema. Este mecanismo genera un ciclo retroalimentado: a mayor extracción, mayor

movilización del As y menor capacidad de recuperación, consolidando un escenario de contaminación crónica característico de los acuíferos sometidos a presión antrópica intensa en el norte y centro del país.

11.13.4 Acuífero Guadalupe de las Corrientes

Área de estudio

El acuífero *Guadalupe de las Corrientes* 322 determinado por CONAGUA, se localiza en el centro-norte del estado de Zacatecas, entre 23°20' y 24°15' de latitud norte, y los meridianos 102°03' y 102°52' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 4,633 km².

Tipo de acuífero

De acuerdo con CONAGUA (2024), el acuífero tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido por un medio granular y otro fracturado.

Clima

El área cubierta por el acuífero predomina el clima seco templado (BS0kw), con variantes BS1kw (semiseco templado) al suroriente y BS0hw (seco semicálido) en el noreste. El régimen de lluvias es de tipo estival, concentrado entre junio y septiembre, representando el periodo de mayor precipitación

Geomorfología

El acuífero presenta tres unidades geomorfológicas:

1. Sierras (Guadalupe de las Corrientes y San Julián). La Sierra de Guadalupe de las Corrientes se ubica al noroccidente y la Sierra San Julián al oriente del acuífero.

- Material predominante: Calizas de las Formaciones Cuesta del Cura y Cupido, y lutitas de la Formación Indidura.
- Origen: Levantamientos tectónicos y erosión sobre secuencias carbonatadas del Cretácico.
- Relieves alargados y estructurados, con drenaje dendrítico e intermitente.

2. Lomeríos. Mayor presencia en la porción sur del área.

- Material predominante: Lutitas y areniscas de la Formación Caracol, calizas y lutitas de la Formación Indidura, y calizas redondeadas de las Formaciones Cuesta del Cura y Cupido.
- Origen: Erosión diferencial de materiales sedimentarios de antiguas secuencias marinas.

- Favorecen la infiltración y transición hacia las llanuras.

3. Llanuras aluviales. Región central del acuífero.

- Material predominante: depósitos aluviales y lacustres, arenas, limos y rocas ígneas vulcano-clásticas.
- Origen: Relleno de pequeños grabens tectónicos con materiales del Terciario y Cuaternario.
- Drenaje escaso e intermitente de tipo endorreico; zonas de acumulación y recarga más importantes del sistema acuífero.

Geología

La región se encuentra en provincia del Altiplano Mexicano, en el límite occidental con la Sierra Madre Occidental. Conformada por tres terrenos tectonoestratigráficos: Parral, Guerrero y Sierra Madre de origen tectónico.

Existen condiciones potenciales de liberación asociadas a la interacción agua-roca prolongada y al predominio de ambientes alcalinos reductores, similares a los observados en otros acuíferos del Altiplano Zacatecano (Padilla, et al. 2012). El estudio reporta un grado de deterioro químico por procesos de disolución de minerales secundarios en los sedimentos y por el retorno de aguas de riego.

Aprovechamientos e hidrometría

De acuerdo con el censo de aprovechamientos de CONAGUA (2009), en el acuífero Guadalupe de las Corrientes se registran 417 pozos y 169 norias, de los cuales 165 se destinan al uso agrícola, 36 al uso público-urbano, 24 al doméstico y 212 al pecuario. Esta distribución confirma el carácter eminentemente agropecuario del acuífero, donde más del 95 % de la extracción total se destina a actividades agrícolas y pecuarias, mientras que menos del 4 % corresponde al abastecimiento urbano y doméstico.

El predominio de la agricultura de riego ha colocado al sistema en una condición de sobreexplotación crónica, evidenciada por los abatimientos piezométricos registrados entre 2010 y 2015, con descensos particularmente marcados en zonas con alta densidad de pozos (CONAGUA, 2015). La intensificación de la extracción, combinada con la escasa recarga natural y el clima árido-semiárido característico de la región, ha provocado una reducción sostenida de los niveles de agua subterránea y una disminución progresiva del almacenamiento.

Desde 1981, el acuífero se encuentra bajo veda de extracción tipo II y III, lo que prohíbe otorgar nuevos volúmenes concesionables y confirma un estado de agotamiento hidrológico permanente. Este escenario refleja un sistema hídrico altamente presionado, donde la demanda supera la capacidad de renovación y genera condiciones favorables para la degradación de la calidad del agua subterránea.

Disponibilidad de agua subterránea en el acuífero

La Disponibilidad Media Anual (DMA) de agua subterránea se calcula utilizando la fórmula de la NOM-011-CONAGUA-2015: $DMA = R - DNC - VEAS$

Calculo: $DMA = 32.8 - 0.0 - 42.802299$ $DMA = -10.002299 \text{ hm}^3/\text{año}$

El acuífero presenta un déficit de 10,002,299 m³ anuales, lo que indica sobreexplotación y la imposibilidad de otorgar nuevas concesiones de agua subterránea (CONAGUA, 2002).

La persistencia de este déficit ha generado descensos piezométricos que modifican las condiciones hidrogeológicas del acuífero y favorecen la movilización de elementos traza. En particular, la presencia de As y F se asocia al bombeo intensivo y al incremento del pH, condiciones que promueven la desorción y liberación de estos elementos desde minerales presentes en los sedimentos. Este comportamiento es consistente con lo observado en acuíferos contaminados del norte y centro de México, donde la combinación de sobreexplotación y ambientes alcalinos reductores propicia la liberación sostenida de contaminantes naturales en el agua subterránea.

12 CONCLUSIONES

1. Persistencia del As como riesgo nacional

El As destaca como el metal contaminante más abundante en acuíferos a nivel nacional, superando el LMP de la OMS (0.010 mg/L) y de la NOM-127-SSA1-2021 (0.025 mg/L) en el 64.4% de los sitios monitoreados. Esta persistencia crónica se concentra en el Altiplano Mexicano y cuencas endorreicas/semiendorreicas, donde convergen geología volcánica/volcano sedimentaria, climas áridos-semiáridos y extracción intensiva.

2. Factores de presión y control

El conjunto de evidencias indica que la contaminación por As en acuíferos mexicanos es un fenómeno estructural, sostenido por la interacción de presiones antrópicas (bombeo agrícola/urbano, retorno de riego, expansión ganadera) con condiciones geogénicas (minerales portadores de As, óxidos de Fe, cenizas/riolitas/tobas fracturadas). Favoreciendo los tiempos de residencia elevados, pH y condiciones redox que liberan y movilizan el As. Reforzando la hipótesis de múltiples fuentes y procesos en la contaminación.

3. Aporte metodológico Índice Ambiental de As (IAA)

El (IAA) demostró ser una metodología eficaz para sintetizar variables de persistencia, intensidad y frecuencia de la contaminación de As en un solo marco comparativo, facilitando la clasificación de severidad por pozos y permitiendo priorizar focos de intervención donde los mapas del IAA son accionables para planeación hídrica y sanitaria.

4. Alta severidad en sitios clasificados como Nivel 1 según el IAA

El IAA facilitó la identificación de 13 pozos con severidad crítica (Nivel 1) que clasifican los mayores valores de concentración crónica de As. Estos sitios, representan el 14.8% del total de los estados del corredor centro-norte

5. Persistencia temporal

El análisis de coincidencias de datos de concentración anuales reveló que los sitios contaminados con As tienden a persistir en el tiempo. Esta estabilidad espacio-temporal sugiere fuentes y procesos estructurales (no eventos aislados), por lo que las soluciones deben ser sistémicas (gestión de extracción, reconversión productiva, tratamiento en punto de uso y sistemas municipales).

6. Vulnerabilidad hidrogeológica del Acuífero “Los Planes”

El caso del acuífero “Los Planes” en Baja California Sur resalta una vulnerabilidad al combinar intrusión marina, fallas geológicas activas (El Sargento) y una marcada contaminación por metales pesados (As, Fe, Cd, Cr, Pb). Esto lo convierte en un modelo de estudio para entender la interacción entre presión geológica e intrusión salina como factores agravantes.

7. Cuatro acuíferos clave (síntesis comparativa)

- Valle del Guadiana (Durango): acuífero heterogéneo y anisótropo con aluviales/lacustres sobre volcánicos fracturados; alta evaporación y largos tiempos agua-roca que sostienen la presencia de As. Historial de excedencias y presión urbano-agrícola.
- La Muralla (Guanajuato): sobreexplotación crónica y desmineralización progresiva por recarga meteórica diluida; cambio del almacenamiento hacia aguas más jóvenes coexiste con unidades volcánicas fracturadas que facilitan movilidad de As.
- Principal–Región Lagunera (Coahuila): caso emblemático de hidroarsenicismo; descensos piezométricos sostenidos, intercalaciones finas y óxidos de Fe que adsorben/desorben As; presión agrícola, industrial y urbana de largo tiempo.
- Guadalupe de las Corrientes (Zacatecas): déficit estructural (vedas, sin volúmenes concesionables), uso agrícola dominante, y condiciones hidrogeoquímicas (pH y redox) que favorecen movilidad de As y F; descensos localizados donde se densifica el bombeo.

8. Validez metodológica de la simulación Monte Carlo

La comparación entre los métodos de simulación mediante construcción manual de algoritmo adaptativo y simulación asistida por la función automatizada del módulo integrado mostró resultados similares (diferencias del orden de 10^{-5} mg/L), lo que valida la precisión del módulo integrado de Origin Pro y respalda la solidez del modelo estocástico adaptativo aplicado para proyectar concentraciones futuras de As.

9. Hallazgos de Monte Carlo (tendencias).

Las simulaciones en pozos representativos de los 4 estados mostraron que, bajo escenarios de extracción, la probabilidad de mantener o superar el LMP permanece elevada.

13 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

El cronograma propuesto para este proyecto de investigación establece una secuencia de actividades distribuidas a lo largo de un periodo de 24 meses seccionado en 4 semestres. Estas actividades abarcan desde la recopilación de datos hasta la interpretación de resultados y la presentación final del informe (Tabla 25).

Tabla 25. Cronograma de actividades.

ACTIVIDADES	SEMESTRE				
	1ro	2do	3ro	4to	
1. Recopilación y uso de bases de datos					
Protocolo de investigación	■				
Búsqueda bibliográfica	■	■			
Selección de revistas indexadas	■	■			
JCR	■	■			
2. Selección y validación de datos					
Uso de datos de la red de vigilancia de la CONAGUA		■			
Seleccionar pozos focales que excedan los LMP de contaminantes conforme a la NOM-127-SSA1-2021		■			
3. Análisis espacial					
Geolocalizar los pozos focales a través de ArcGIS		■			
4. Análisis estadístico					
Análisis descriptivo			■		
Análisis temporal de las concentraciones			■		
Índice Ambiental de As			■		
5. Diseño y modelación					
Modelado Monte Carlo					
6. Revisión y difusión final					
Revisión de tesis	■	■			
Difusión del informe final	■	■		■	

14 BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES CONSULTADAS A LA FECHA

- Ali, H., Khan, E. y Sajad, MA (2013). Fitorremediación de metales pesados: conceptos y aplicaciones. *Quimiosfera*, 91 (7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- American Public Health Association (APHA). (1995). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (19th ed.). Washington, DC: American Public Health Association.
- Armienta, M., Villaseñor, G., Rodríguez-Castillo, R., Ongley, L. K., & Mango, H. (2001). The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapán Valley, México. *Environmental Geology*, 40(4–5), 571–581. <https://doi.org/10.1007/s002540000220>
- ATSDR (2007). Perfil toxicológico del arsénico. Agencia de Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades. Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades. Atlanta, Georgia. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp2.pdf>. 15/10/2010.
- Bain, J., Blowes, DW, Robertson, WD y Frind, EO (2000). Modelado de oxidación de sulfuros con transporte reactivo en un sitio de drenaje de mina. *Revista de hidrología contaminante*, 41 (1–2), 23–47. [https://doi.org/10.1016/s0169-7722\(99\)00069-8](https://doi.org/10.1016/s0169-7722(99)00069-8)
- Bain, R., Cronk, R., Hossain, R., Bonjour, S., Onda, K., Wright, JA, Yang, H., Slaymaker, T., Hunter, PR, Prüss-Üstün, A., y Bartram, J. (2014). Evaluación global de la exposición a la contaminación fecal a través del agua potable basada en una revisión sistemática. *MT y HI. Medicina Tropical y Salud Internacional/TM & HI. Medicina tropical y salud internacional*, 19 (8), 917–927. <https://doi.org/10.1111/tmi.12334>
- Blake, M. C., Javko, A. S., Moore, T. E., Chavez, V., Saleeby, J. B. y Seel, K., 1984, Tectonostratigraphic terranes of Magdalena Island, Baja California Sur: en Frizzel, V. A., ed., *Geology of the Baja California Península: Pacific Section SEPM*, v. 39, p. 183-191.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). Informe de calidad de agua y clasificación hidroquímica: Acuífero Los Planes, Baja California Sur. Recuperado de <https://www.gob.mx/conagua>
- CONAGUA (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Los Planes (0323), Estado de Baja California Sur.*

- D'Alessandro, W. (2006). Fluorosis humana relacionada con la actividad volcánica: una revisión. *Transacciones WIT sobre Biomedicina y Salud* . <https://doi.org/10.2495/etox060031>
- Damanik-Ambarita, MN, Lock, K., Boets, P., Everaert, G., Nguyen, THT, Forio, M. a. E., Musonge, PLS, Suhareva, N., Bennetsen, E., Landuyt, D., Domínguez-Granda, L., & Goethals, P. (2016). Análisis ecológico de la calidad del agua de la cuenca del río Guayas (Ecuador) basado en índices de macroinvertebrados. *Limnológica* , 57 , 27–59. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.01.001>
- Díaz-Martínez, Jorge Alberto y Granada-Torres, Carlos Arturo. (2018). Efecto de las actividades antrópicas sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas del río Bogotá a lo largo del municipio de Villapinzón, Colombia. *Revista de la Facultad de Medicina* , 66 (1), 45 <https://doi.org/10.15446/revfacmed.v66n1.59728>
- Duque, G. (2022). Manual de geología- Cap 18. Aguas Subterráneas. *Puerta de la investigación* .
- El reporte State of the Climate (NOAA 2016) establece que el año 2015 sobrepasó al año 2014 como el año más cálido desde mediados del siglo XIX.
- Escalona-Domenech, RY, Infante-Mata, D., García-Alfaro, JR, Ramírez-Marcial, N., Ortiz-Arrona, C., & Macías, EB (2022). Evaluación de la calidad del agua y de la ribera en la cuenca del río Margaritas, Chiapas, México. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental* , 38 , 37–56. <https://doi.org/10.20937/rica.54092>
- Espinal-Carreón T., Sedeño J.E. y López E. (2013). Evaluación de la calidad del agua en la Laguna de Yuriria, Guanajuato, México, mediante técnicas multivariadas: un análisis de valoración para dos épocas: 2005, 2009- 2010. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 29 (3), 147-163. Redalyc.org. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37028276002>
- Falkenmark, M., (1993). Escasez de agua: hora de realismo. *Pópuli*. 20(6): 11-12.
- Farmus L., Till C., Green R., Hornung R., Martínez-Mier E.A., Ayotte P., Muckle G., Lanphear B.P. y Flora D.B. (2021). Critical windows of fluoride neurotoxicity in Canadian children. *Environmental Research* 200, 111315. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111315>
- García, L., & Iannacone, J. (2014). *Pseudomonas Aeruginosa un indicador complementario de la calidad de agua potable: análisis bibliográfico a nivel de Sudamérica* . <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4755797>

- Gastil, G., Morgan, G., y Krummenacher, D. (1981). The tectonic history of Peninsular California and adjacent Mexico. En W. G. Ernst (Ed.), *The Geotectonic development of California* (pp. 285–306). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Girbau, G. (2002). *Enfermería Comunitaria I*. Salud Pública. Masón.
- Gleick, P.H. (1993). *Agua en crisis: una guía de los recursos de agua dulce del mundo*. Nueva York: Oxford University Press.
- Gleick, P.H. (2002). Gestión del agua: Caminos de aguas blandas. *Naturaleza* , 418 (6896), 373. <https://doi.org/10.1038/418373a>
- Grandjean, P. (2019). Neurotoxicidad del fluoruro en el desarrollo: una revisión actualizada. *Salud Ambiental* , 18 (1). <https://doi.org/10.1186/s12940-019-0551-x>
- Grondona, S., Massone, H., González, M., y Bedmar, F. (2022). Evaluación del peligro de contaminación del agua subterránea en áreas agrícolas. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental* , 38 , 111–125. <https://doi.org/10.20937/rica.54194>
- Grondona, S., Sagua, M., Massone, H., y Miglioranza, K. (2015). Evaluación de la vulnerabilidad social asociada al consumo de agua subterránea en la cuenca del río Quequén Grande, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 31(4), 351-359. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992015000400003&lng=es&tlng=es.
- Gutiérrez, L. (2018). *El agua en México. Actores, sectores y paradigmas*. COMECOSO. <https://www.comecoso.com/publicaciones/agua-mexico-actores-sectores-paradigmas>
- Gutiérrez, M., y Alarcón, H.M.T. (2022). Fluoruro en aguas subterráneas de la región centro-norte de México y su posible origen. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental* , 38 , 389–397. <https://doi.org/10.20937/rica.54307>
- Gutiérrez, R. y Emanuelli, P. S. (2010). “Régimen Jurídico del Agua Continental en México: Un Análisis Crítico”, Cap. 23 en *El Agua en México: Cauces y encauces*, Jiménez, B.; Torregrosa, M. L., y Aboites, A. (eds.), Academia Mexicana de Ciencias, 702 pp., México, pp. 647-680.
- Harvey, C. F., Swartz, C. H., Badruzzaman, A. B. M., Keon-Blute, N., Yu, W., Ali, M. A. Brabander, D. (2005). Spatial variability of groundwater arsenic concentration as a function of aquifer sediment age and geochemical conditions. *CR Geoscience*. 337 (285–296).

- Herrera, R. G., Euán, B., Pinto, I. SY, y Rodríguez, J.H.O. (2018). El acuífero yucateco. Análisis del riesgo de contaminación con apoyo de un sistema de información geográfica. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental* , 34 (4), 667–683. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.04.09>
- Higuera I.A., Castillo E.I., Eslava C.C., Cifuentes E., Cortés M.J., Murillo R.M. y Yalaupari M.J.P. (2000). *Contaminación del Agua y efectos en la salud*. <http://cofepris.salud.gob.mx/bv/libros/Cap02.pdf> 22/11/2007
- Hughes, MF, Del Razo, LM y Kenyon, EM (2000). Efectos dependientes de la dosis sobre la distribución tisular y el metabolismo del ácido dimetilarsínico en el ratón después de la administración intravenosa. *Toxicología* , 143 (2), 155–166. [https://doi.org/10.1016/s0300-483x\(99\)00169-9](https://doi.org/10.1016/s0300-483x(99)00169-9)
- Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO). (2023). *Aguas en México: ¿escasez o mala gestión?* Mexico.
- Jakobsen, R., Kazmierczak, J., Sørensen, H. U., & Postma, D. (2018). Spatial variability of groundwater arsenic concentration as controlled by hydrogeology: Conceptual analysis using 2-D reactive transport modeling. *Water Resources Research*, 54(12), 10,254–10,269. <https://doi.org/10.1029/2018WR023685>
- Jiménez, C. M. I., Cárdenas, G.M., Ortiz, P. M. D. y del Razo, L.M. (2021). *Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 70-78.
- Jiménez, C., B. y Galizia T. J. (2012.). *Diagnóstico del agua en las Américas*. México: Red Interamericana de Academias de Ciencias.
- Jiménez, C., B., Durán, A. J. C., y Méndez C. J. M. (2010). En “El Manejo de las Aguas Mexicanas en el Siglo XX”, Cap. 2 en *El Agua en México: Cauces y encauces*, Jiménez, B., Torregrosa, M. L., y Aboites, A. (eds.), Academia Mexicana de Ciencias, 702 pp., México, pp. 265-290.
- Jung, M.C. (2001). Contaminación por metales pesados de suelos y aguas dentro y alrededor de la mina Imcheon Au-Ag, Corea. *Geoquímica aplicada* , 16 (11–12), 1369–1375. [https://doi.org/10.1016/s0883-2927\(01\)00040-3](https://doi.org/10.1016/s0883-2927(01)00040-3)
- Lee, K., Tanabe, S. y Koh, C. (2001). Distribución de pesticidas organoclorados en sedimentos de la Bahía de Kyeonggi y áreas cercanas, Corea. *Contaminación ambiental* , 114 (2), 207–213. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(00\)00217-7](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(00)00217-7)

- Leyva, C.D.O., Ponce, V. G., Botello, A.V. y Díaz, G. G. (2003). Plaguicidas organoclorados persistentes en sedimentos costeros de Petacalco ay, Guerrero, México. *Boletín de Contaminación y Toxicología Ambiental*, 71 (6). <https://doi.org/10.1007/s00128-003-8866-1>
- Lin, Z. (1997). Movilización y retención de metales pesados en relaves de minas de sulfuros de Garpenberg, Suecia. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 198 (1), 13–31. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(97\)05433-8](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(97)05433-8)
- Márquez, P. H., Leyva, M. J. B., Davizón, C. Y. A., Ontiveros, G. L. A., y Amillano, C. J. M. (2023). Análisis de tendencia de parámetros indicadores de la calidad del agua en un embalse tropical. *Ecosistemas Y Recursos Agropecuarios*, 10(2). <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3562>
- Martín I. (2019). Riesgo sanitario por presencia de *Pseudomonas aeruginosa* en el agua para consumo: cuenca del arroyo Las Catonas. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de General Sarmiento. Buenos Aires, Argentina, 53 pp
- Martínez, G. G., y Sethi, P.S. (1997). *Pliocene carbonates and related facies flanking the Gulf of California, Baja California, Mexico* (pp. 141–166). Geological Society of America Special Paper.
- Martínez, S. R. I., Díaz, B. F., Batres, E. L.E., y Pérez, M. I. N. (2010). Evaluación de los niveles de DDT y sus metabolitos en muestras de suelo y polvo de Chiapas, México. *Contaminación y Toxicología Ambiental*, 86 (1), 33–37. <https://doi.org/10.1007/s00128-010-0174-y>
- Martínez-Salinas R.I., Díaz-Barriga F., Batrés-Esquivel L.E. y Pérez-Maldonado I.N. (2011). Assessment of the levels of DDT and its metabolites in soil and dust samples from Chiapas, Mexico. *Bull. Environ. Con-tam. Toxicol.* 86 (1), 33-37
- Martínez-Prado, C., López-Ramírez, J. A., y Rodríguez-Castillo, R. (2013). Evolución hidrogeoquímica, su relación con los sistemas de flujo y la contaminación por arsénico en el acuífero Valle del Guadiana, México. *Journal of Water Resource and Protection*, 5(12), 1161–1170. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.512123>
- Matthews, G. A. (2015). *Pesticidas: Salud, Seguridad y Medio Ambiente*. 2 ed. Wiley Blackwell, 296 pp
- Mena, E. X. y Couoh, U. Y. (2015). Efectos de los plaguicidas utilizados para el control de la sigatoka negra en plantaciones bananeras en México, así como su efecto en el ambiente y la salud pública. *Tecnociencia*. 9 (2), 91-98
- Mihelcic, J., y Julie, Z. (2012). *Ingeniería Ambiental: Fundamentos, Sustentabilidad, Diseño*. 1ra ed. Mexico D.F. Alfaomega.

- Moncur, M. C., Ptacek, C. J., Blowes, D. W., y Jambor, J. L. (2005). Liberación, transporte y atenuación de metales de un antiguo depósito de relaves. *Geoquímica Aplicada* , 20 (3), 639–659. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.09.019>
- Mora, B. D., Del Carmen, S. P., L., Del Razo, L. M., González, A. C. A., Medina, D. I. M., De Lourdes, R. M.M., y Rojas, G. A. E. (2012). Presencia de arsénico y coliformes en agua potable del municipio de Tecuala, Nayarit, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(2), 127-135. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/31632>
- Mukherjee, A., Fryar, A. E., y Howell, P. D. (2007). Hidro estratigrafía regional y modelado de flujo de agua subterránea en las áreas afectadas por el arsénico de la cuenca de Bengala occidental, Bengala Occidental, India. *Revista de hidrogeología* , 15 (7), 1397–1418. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0208-7>
- Ohura, T., Horii, Y., Kojima, M. y Kamiya, Y. (2013). Variabilidad diurna de los hidrocarburos aromáticos policíclicos clorados en el aire urbano, Japón. *Medio ambiente atmosférico* , 81 , 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.044>
- OMS (2012). *Guías de la OMS para la calidad del agua potable*. 3a ed. World Health Organization. Ginebra, Suiza, 408 pp
- OMS (2022). Agua para consumo humano. Organización Mundial de la Salud [en línea]. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water> 21/01/2022
- Ortiz, P. D., Rodríguez, M. M., Martínez, F., Borja, A.V. H., Castelo, J., Grimaldo, J. I, De La Cruz, E., Carrizales, L., & Díaz, B. F. (2003). Alteración de las hormonas reproductivas en los hombres inducida por fluoruro. *Investigación ambiental* , 93 (1), 20–30. [https://doi.org/10.1016/s0013-9351\(03\)00059-8](https://doi.org/10.1016/s0013-9351(03)00059-8)
- Owino, V., Ahmed, T., Freemark, M., Kelly, P., Loy, A., Manary, M. y Loechl, C. (2016). Disfunción entérica ambiental y retraso en el crecimiento/retraso en la salud infantil global. *Pediatría* , 138 (6). <https://doi.org/10.1542/peds.2016-0641>
- Paul, D. S., Harmon, A. W., Devesa, V., Thomas, D. J., y Stýblo, M. (2007). Mecanismos moleculares de los efectos diabéticos del arsénico: inhibición de la señalización de la insulina por arsenito y ácido metilarsonoso. *Perspectivas de salud ambiental* , 115 (5), 734–742. <https://doi.org/10.1289/ehp.9867>
- Pérez, DD, López, M., Colmán, D., González, C., Navarro, NP, Morínigo, M., Araujo, S., Cáceres, A., Pizzurno, J., & Yubero, F. (2019). Concentración de fluoruro en agua subterránea y su relación con los niveles de calcio sérico en niños residentes en el distrito de Loreto, Concepción, Paraguay. *Memorias Del Instituto De Investigaciones*

En Ciencias De La Salud , 17 (2), 24–35. <https://doi.org/10.18004/mem.iics/1812-9528/2019.017.02.24-035>

Pérez, M. E. A., Sandoval, A. P., Sánchez-Cohen, I., Del Rosario Salcedo Jacobo, M., & Trejo-Calzada, R. (2017). Calidad química del agua en un área agrícola de maíz forrajero (*Zea mays L.*) En la Comarca Lagunera, México. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 33(1), 75–83. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.01.07>

Pinilla, G. A., (2000). *Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia*. Tesis: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá. 67 pp.

Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA). (2024). Informe de monitoreo de calidad del agua: Acuífero Los Planes, Baja California Sur. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Recuperado de <https://www.gob.mx/conagua>

Rodríguez V.M, Del Razo L.M, Limón-Pacheco J.H, Giordano M., Sánchez, P. L.C, Uribe, Q. E., Gutiérrez, G. y Gonsebatt, M.E. (2005). Inhibición de la glutatión reductasa y distribución de arsénico metilado en el cerebro y el hígado de ratones CD1. *Ciencias Toxicológicas* , 84 (1), 157–166. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfi057>

Rodríguez, M.G. y Escalante, A.E.F. (2006). Hidrogeología básica: las aguas subterráneas y su flujo. Pp.29-33

Roldán G. (1999). Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 23 (88), 375-387.

Romero V., Frances J., Norris F.J., Ríos J.A., Cortés I., González A., Gaete L. y Tchernitchin A.N. (2017). Consecuencias de la fluoración de agua potable en la salud humana. *Revista Médica de Chile* 145, 240-249. <https://dpi.org/10.4067/S0034-98872017000200012>

Rondiere, P. (1972). *La muerte del agua*. Editorial Noguer, SA, Barcelona. Madrid.

Roussel, C., Néel, C. y Bril, H. (2000). Minerales que controlan la solubilidad del arsénico y del plomo en los relaves de una mina de oro abandonada. *Ciencia del medio ambiente total* , 263 (1–3), 209–219. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(00\)00707-5](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(00)00707-5)

Sánchez, R.J.P.Y. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Sociedad Geológica Mexicana* , 59 (1), 19–42. <https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n1a3>

- Savoy, H., LaBolle, E. M., y Weissmann, G. S. (2017). *Geological heterogeneity: Goal-oriented simplification of structure and function. Advances in Water Resources*, 10, (1–15). <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.12.006>
- SEMARNAT. (2018). Programa Nacional Hídrico 2014-2018. Mexico, D.F., Mexico.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (1996). Carta Geológico-Minera San Antonio, F12-B13 [Escala 1:50,000]. México: SGM.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2000). Carta Geológico-Minera San Juan de los Planes, F12-B14 [Escala 1:50,000]. México: SGM.
- Shen, J. y Schäfer, A. (2014). Eliminación de fluoruro y uranio mediante nanofiltración y ósmosis inversa: una revisión. *Quimiosfera*, 117, 679–691. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.090>
- Singh, K. P., Malik, A., Mohan, D. y Takroo, R. (2005). Distribución de residuos de pesticidas organoclorados persistentes en el río Gomti, India. *Boletín de Contaminación y Toxicología Ambiental*, 74 (1), 146–154. <https://doi.org/10.1007/s00128-004-0561-3>
- Tchobanoglous, G. & Schroeder, E. D. (1985). *Water Quality*. Addison-Wesley Publ. Co. Reading, Massachusetts: 768.
- Tim U.S. y Jolly R. (1994). Evaluación de la contaminación agrícola de fuentes difusas utilizando sistemas integrados de información geográfica y un modelo hidrológico/de calidad del agua. *Revista de Calidad Ambiental*, 23 (1), 25–35. <https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300010006x>
- Twarakavi N. y Kaluarachchi J. (2006). Sostenibilidad de la calidad del agua subterránea considerando cambios en el uso del suelo y riesgos para la salud pública. *Revista de Gestión Ambiental*, 81 (4), 405–419. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.11.008>
- USEPA (2006). EPA-230-2-06-002. Regulatory Plan and Semiannual Regulatory Agenda. United States Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/regulations/documents/regagendabook-fall2006.pdf> 9/09/2010.
- Wen, C. L., Hwa, L. Y. y Chung, E. C. (2011). Evaluación de la calidad del agua en un lago alpino subtropical mediante técnicas estadísticas multivariadas y mapeo geoestadístico: un estudio de caso. *Revista Internacional de Investigación Ambiental y Salud Pública*, 8 (4), 1126–1140. <https://doi.org/10.3390/ijerph8041126>
- Werner J. (1996). Introducción a la Hidrogeología. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias de la Tierra. Primera edición.

Yuan, Z., Luo, T., Liu, X., Hua, H., Zhuang, Y., Zhang, X., Zhang, L., Zhang, Y., Xu, W. y Ren, J. (2019). Seguimiento de las emisiones antropogénicas de cadmio: desde las fuentes hasta la contaminación. *Ciencia del Medio Ambiente Total* , 676 , 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.250>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

PROGRAMAS EDUCATIVOS DE CALIDAD RECONOCIDOS POR CIEES, CACEI Y CONAHCYT

SGI Certificada en la norma ISO 9001:2015 e ISO 21001:2018

FORMATO T-2

NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA
Y DICTAMEN DE REVISIÓN

Cuernavaca, Mor., a 10 de febrero del 2026.

DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑO
DR. RUBEN OSWALDO ARGUELLO VELASCO
DR. JUAN MANUEL RIVAS GONZÁLEZ
DR. ZAKARYAA ZARHRI
DRA. MARIANA ROMERO AGUILAR
P R E S E N T E

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la comisión revisora de la tesis que presenta VANELY LIZETTE ESPINOZA SILVA, titulado: EVALUACIÓN DE LA PERSISTENCIA DE METALES PESADOS EN ACUÍFEROS DE MÉXICO MEDIANTE UN ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL Y MODELACIÓN MONTE CARLO PARA LA GENERACIÓN DE UN ÍNDICE AMBIENTAL realizada bajo la dirección del Dr. Zakaryaa Zarhri y la Co-dirección de la Dra. Mariana Romero Aguilar, del Programa Educativo de la Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías sustentables. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

ATENTAMENTE
Por una humanidad culta

MTRA. ANGELICA GALINDO FLORES
DIRECTORA DE LA FCQEI

D I C T A M E N

MTRA. ANGELICA GALINDO FLORES
DIRECTORA DE LA FCQEI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

DICTAMEN

NOMBRE	VOTO	FIRMA
DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑO	APROBADO	
DR. RUBEN OSWALDO ARGUELLO VELASCO	APROBADO	
DR. JUAN MANUEL RIVAS GONZÁLEZ	APROBADO	
DR. ZAKARYAA ZARHRI	APROBADO	
DRA. MARIANA ROMERO AGUILAR	APROBADO	

Se anexan firmas electrónicas





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANO INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

ANGELICA GALINDO FLORES | Fecha:2026-02-11 15:33:07 | FIRMANTE

OS9iAdNYXVcgp8mZ1u5nhy25+Gh2v3+uugYWSm0C7dpc06gs3ggFqS0oPjV9YTBtN1IH7jiE8xfA0HkFbmQOwkDbEdWsXhGbB68Gkf66GxFnHfJHnG2WPm9fAZ8ryE6vF8BUwW4ROxLLvGslEUCUCnu0Y95glKcTrJfVUETMxNQCpGo4WD3kbY+0IKmGibh4rNxrBmE5g4yiWxUewdrbG749D7FNGLT1Sdu3z94jEoohJKtKZF5LhWAILMntNIPstE3MbY/ZOfii9Dkr4/7y//xMhVOe6W9R0fwXUmm9rcaZFTXjXBut9d2nWsxgoySMtpmHry/YC0km4SQ/A==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[dv6cO9xWD](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/AwHZMU9EXQnih0AZ9ITHkCY7LeFsWPqB>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

JUAN MANUEL RIVAS GONZALEZ | Fecha:2026-02-12 10:53:31 | FIRMANTE

pfLUm9rk2tLRWm5FKJFAAaLwf2TvkNklGKFyEEvEKYJ+BSITlsh59GUK7QwWfx36drKlZuKZeGFHX/ZqAw7Kkdy+VYSZ/dqvsG1siA7mWlnahmMZQDKUxiTc95mepCb7TU1n+d hgXNbmQynru8fMPaIkQBtf/PkU3UqEz1HDSmfqi1Oi6t7Pn3T18ZyKUjM7lGkNe7+hH46h4va91BclBmXGhYnId8Wjs5MlaQQgXuVBW0FF1aaeTBwSchMEyOpX9NMjogJ8eVOBa cpm8+vYcMdnIUa2T5UF0UHADQPxl6krZmmNOhTv6dVGCuSWxlz6sm6AAasV4fk44gHOGT0Q==

MARIANA ROMERO AGUILAR | Fecha:2026-02-12 11:03:07 | FIRMANTE

zwaIVT8+u2IjPpvrWdHYEgS+6OvnTO7BADw7T65yVITLoFkHV5vpPZ9W1ppGsho3Ql/zHvdoTe3tl5NnPyIHTZWrjCERLVBTHB7/ScWLMOMmrkReQMKeB2RE4G8tXPD/unxrn rqEYz+h2uLS39FCDu4RcrStCyknnDQL4r7gnaMGRmGOZy+sKSBUN3+nJpDSp+5vpTzVVVKJCqG0lqNq6rQWskVoP26zMX2brkazZMH4duYjvwj+AG5DLUvDjhtZt99XH9DTh q4lO5Zbx9y99lXed6rdjJ3omqH8cBeCgMgZlcb+Xl2jBGDI7UyFjlpwqAVOJcvPp7r5pC1rL0mA==

HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA | Fecha:2026-02-12 11:14:55 | FIRMANTE

jk2i1kpHPb6UKEPv2vR9xP1+mvm5YTFsxAyMYnWV0wronlaoQZDNBdUpdPm/H CZKlnMztQ930h2TqS6v2EX4PRZ4irQN8s2fKiljSbStfg9APsdGHqLIXCUVxLADxCHchFA8s1L DT1IL4/P54qOm1Lp/z9v6trlnN3o08N5aSaSvbGw7eZ9JO+7HnOVj2cCmlBzxQnlFcz/UFwOirsBX1+BUQu/0Eeq+oZH4WR+9PXXUuwsYqyW/zgUqC7ojFrkyUnBZmuXh/bgizp+/l HmOu37y7mHNdtKEaydnGp8Suusf2vCsvJeU331Ri3PXs4Qj7oTDRCLFhJ2LpbRxoFsglw==

ZAKARYAA ZARHRI | Fecha:2026-02-12 11:22:03 | FIRMANTE

hbYSovzD2mLagzkFxsNrNIFASmiZMq9gBSmTDi+4GDG9B+14bmYnbNtYIUdBI5MBsx9iY65gLU+1Afu+qcH7wBF2AeXSJk1afRQQMd9uaDdDBJqBjV8f7Wf1IEBVQimqewDho qZ1Pdldcb1RjJaaCwQ5AzqiEK0F9CXNCQ+4mCdS9NFWkUbKRHT5i0/ggOmrqe961c5DhYelSJM2iveHZKNbWS87FJzj1Djws1a5ZgyH9nc/FUZrbedottMvF0rRUek2mYpBIZFX CoQFj5vjAbByjVQfmmSDLY6aiPn/L8swWPxLSisTsn6n4zUKPOyL4BjWUTntUiUaC6agdyypQ==

RUBEN OSWALDO ARGUELLO VELASCO | Fecha:2026-02-12 11:34:32 | FIRMANTE

yelmAhLe9fuM9+nHriMbibJ1j5wbEoiXHYViiTvrpRxbjnNjKqGqSNDwRLJuTVfaPxGLqR0yunU2pMGVjIDJbilgwBFgiEVsu08XMQCsc8ZfkC1Zh1o/GKGBr53mgZoOMSVZaUFUcx +f+DVEIRJvr9NScop3zxxf6T1ZleWJeiTygjiHY65tGbCbdcqSdCUVURKcQ+Wkq7gWgFkONIP/6J1spkcHIEkK/rKK32e8z7QQf5KQdDORK7Q+mcrf+qS4D8UShe34vJim3E2Lu3B o2efBrGT5J3CPwBFBD0xs3OfiOaGDxtrl.snyc2A40XV7Yzj7q3kCKGChXhQFivamMQSQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



MEtogBRJp

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/ecPsZr0UdlyVbYbosgJfwCfrsZpbFSec>

